

DOI:10.11686/cyxb2024335

http://cyxb.magtech.com.cn

敬一胜, 孙宗玖, 刘慧霞, 等. 准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤pH分布特征及其环境影响因素分析. 草业学报, 2025, 34(7): 54—68.

JING Yi-sheng, SUN Zong-jiu, LIU Hui-xia, *et al.* Soil pH distribution characteristics and environmental factors influencing it in sandy desert grassland in the Junggar Basin. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 54—68.

准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤 pH 分布特征及其环境影响因素分析

敬一胜¹, 孙宗玖^{1,2,3*}, 刘慧霞¹, 迪达尔·比苏力旦¹, 李美莎¹, 周晨烨¹, 周磊¹, 于冰洁¹, 李有政¹, 郑丽¹, 阿斯太肯·居力海提¹

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆草地资源与生态自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 西部干旱区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤pH分布特征,采用路线调查结合典型样地布设确定136个样地,以0~100 cm各土层pH实测数据为依据,结合气象数据及“3S”技术,运用单因素方差分析、地统计学分析与地理探测器等方法,探讨土壤pH发生空间变异的主要环境影响因素。结果表明:0~100 cm各土层土壤pH为8.54~8.76,均值为8.66,且随土层深度增加土壤pH表现出上升趋势。小乔木类群土壤pH(8.71)显著高于灌木类群(8.54)1.02倍、半灌木类群(8.59)1.01倍($P<0.05$)。碱性土($7.5<pH<8.5$)主要分布于准噶尔盆地周缘吉木乃县北部、福海县南部,克拉玛依市北部等地区,强碱性土($pH>8.5$)主要分布于阜康市、呼图壁县、玛纳斯县、富蕴县等地区。半方差变异分析可知,0~100 cm土层pH最佳模型的块金效应为49.91%,说明其空间变异由结构因素与随机因素共同影响。地理探测器分析表明,总体上影响土壤pH空间变异的主要环境因子依次为年均温度(0.159)、植被覆盖度(0.152)、雪水当量(0.085)、根部土壤湿度(0.076)、物种丰富度指数(0.066)。研究结果完善了准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤pH数据库,进一步探明了土壤pH产生变异的主控因素,为沙质荒漠管理与生态恢复提供了理论依据。

关键词:土壤pH;空间分布;沙质荒漠草地;准噶尔盆地;地理探测器

Soil pH distribution characteristics and environmental factors influencing it in sandy desert grassland in the Junggar Basin

JING Yi-sheng¹, SUN Zong-jiu^{1,2,3*}, LIU Hui-xia¹, Didaer·Bisulidan¹, LI Mei-sha¹, ZHOU Chen-ye¹, ZHOU Lei¹, YU Bing-jie¹, LI You-zheng¹, ZHENG Li¹, Asitaiken·Julihaiti¹

1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi 830052, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi 830052, China

Abstract: The aim of this study was to explore the distribution characteristics of soil pH and the factors affecting it in sandy desert grassland in the Junggar Basin. First, 136 sample plots were selected and established by a route survey combined with a typical sample plot layout, and the pH of soil samples collected from 0 to 100 cm depth in each plot was measured. Environmental factors such as temperature, vegetation cover, and species richness were determined, and meteorological data were collected. The factors affecting the spatial variation of soil pH were explored on the

收稿日期:2024-08-28;改回日期:2024-11-14

基金项目:新疆维吾尔自治区高校基本科研业务费(XJEDU2022J006)和新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2022D04003)资助。

作者简介:敬一胜(1999—),男,新疆精河人,在读硕士。E-mail: 1326931098@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nmszj@21cn.com

basis of the environmental and meteorological data and “3S” technology, using one-way ANOVA, geostatistical analysis, and geographical detectors drawing on a range of remote sensing data and analytical tools. The results showed the range of soil pH in each soil layer from 0 to 100 cm was 8.54–8.76, and the average value was 8.66. The soil pH showed an upward trend as the soil depth increased. The soil pH of the small arbor group (8.71) was 1.02 times that of the shrub group (8.54) and 1.01 times that of the subshrub group (8.59) ($P < 0.05$). Analyses of soil pH distribution showed that alkaline soil (pH 7.5–8.5) was mainly distributed in the northern part of Jimunai County, the southern part of Fuhai County, and the northern part of Karamay City around the Junggar Basi, and strongly alkaline soil (pH > 8.5) was mainly distributed in Fukang City, Hutubi County, Manas County, Fuyun County, and other areas. Semi-variance variation analysis showed that the nugget effect of the optimal model of soil pH in the 0–100 cm soil layer was 49.91%, indicating that its spatial variation was affected by both structural factors and random factors. Geographic detector analysis showed that the main environmental factors contributing to the spatial variation of soil pH were mean average temperature (0.159), vegetation coverage (0.152), snow water equivalent (0.085), root soil moisture (0.076), and species richness index (0.066). The results of this study add new information about the distribution of soil pH to the database for sandy desert grassland in Junggar Basin, and reveal the main factors contributing to variations in soil pH. These findings provide a theoretical basis for sandy desert management and ecological restoration.

Key words: soil pH; spatial distribution; sandy desert meadows; Junggar Basin; geographical detectors

土壤pH作为反映土壤酸碱程度的关键指标,不仅对微生物活性、土壤养分空间变异起着重要作用,而且控制着土壤重金属元素的存在形态、转移与变化等特性,这些对植被—土壤营养物质的流转与循环以及所在区域的生态质量都具有重要影响^[1–2]。研究表明^[3–4],因受结构因素(自然因素)和随机性因素(人为因素)共同影响,土壤pH在空间分布上表现出的变异特征因研究区的差异而有所不同。如桐柏山北麓^[5]多种利用类型土壤pH表现为强空间自相关性,深层为弱变异,且块金系数小于0.5,结构性因素占主导地位。贵州省安顺市多种利用类型土壤^[6]与陕西汉中市耕地^[7]土壤pH表现为中等程度空间自相关性与变异性,且块金系数小于0.5,结构性因素占主导地位。贵州省山区耕地^[8]土壤pH则表现为弱空间自相关性与中等程度变异,且块金系数大于0.5,随机性因素占主导地位。在结构因素中,有些研究发现土壤pH发生大尺度空间变异主要受年均降水、年均温度等因素影响^[9–11],不同区域主要驱动因子也会出现异同。如四川盆地土壤pH变化的主要驱动因子为年均降水^[9],欧亚大陆干旱区草地土壤pH在受到年均降水梯度变化影响后,对物种丰富度形成不同程度影响^[10],全球范围内免耕地土壤pH主要受年均温度影响^[11]。从不同生态系统看,前人对于土壤pH的研究多汇聚于耕地、森林及草原^[12–14],而对荒漠尤其是沙质荒漠草地研究相对较少。明确干旱区沙质荒漠草地土壤pH分布特征及其影响因素,对于加强干旱区土壤pH的科学管控,推动草地生态恢复等有着重要意义。

准噶尔盆地位于新疆北部,是我国沙漠化较为严重的地区,而沙质荒漠草地在准噶尔盆地分布广,面积大^[15],且植被恢复一直是遏制其退化的关键措施之一^[16–17]。但近年有关准噶尔沙质草地的研究多集中于封育下植被群落特征^[18–19],以及区域尺度上土壤有机碳、容重分布特征及其影响因素^[20–21],而对于区域尺度土壤pH分布特征研究极少。研究表明,土壤中各种酸碱性离子不仅直接影响植被生长发育,而且可通过影响土壤有机碳、全氮、全磷等土壤关键养分间接影响植被分布及其恢复情况^[20,22]。同时,不同荒漠植物生存所需土壤pH范围存在明显差异^[23–24]。因此,明确准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤pH现状及分布特征,对该区域植被恢复具有重要意义。本研究以准噶尔盆地沙质荒漠草地为研究对象,利用统计学参数与单因素方差分析两种经典统计分析方法,以及半方差函数与克里金插值两种地统计方法协同探究土壤pH的变异与分布特征,并采用地理探测器探究气候、地形、植被、土壤理化因子对土壤pH的影响大小,以期对沙质荒漠草地的合理利用与管理,植被恢复的推进提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区域位于准噶尔盆地(N 43.53°–48.42°, E 82.08°–93.51°), 该区域海拔为–100~964 m, 年降水量200 mm 以下, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 年积温3000~4500 $^{\circ}\text{C}$, 气候极为干旱, 是典型的温带荒漠气候。研究区土壤主要由风沙土组成。植被组成以小半乔木白梭梭(*Haloxylon persicum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*), 灌木多种沙拐枣(*Calligonum* sp.)、霸王(*Sarcosygium xanthoxylon*)、麻黄(*Ephedra sinica*)、铃铛刺(*Caragana halodendron*)等, 盐柴类半灌木驼绒藜(*Ceratoides latens*)、多种假木贼(*Anabasis* sp.)等, 蒿类半灌木沙漠绢蒿(*Seriphidium santolinum*)、白茎绢蒿(*Seriphidium terrae-albae*)、准噶尔沙蒿(*Artemisia songarica*)等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与野外采样 依据1:1000000中国植被图及1:1000000新疆草地类型图, 考虑新疆准噶尔沙漠荒漠分布特点, 采用路线调查结合典型样地布设, 共设置136个样点(图1a), 基本做到南北及东西贯穿研究区域。每个样点布设1个100 m×100 m的典型样地, 利用GPS(UG909高精度版, 中国)记录经纬度及海拔等信息。在每个样地上等距离布设9个1 m×1 m草本样方; 如果存在灌木, 另需按照梅花采样法^[25]等距离布设5个10 m×10 m的灌木样方(图1b)。每个样地或样方在测定群落总盖度后, 再分种进行高度、盖度、密度及生物量的测定, 其中生物量草本及半灌木则采用齐地刈割法, 灌木、小乔木则为当年新生枝条及直径小于2 mm的枝条生物量。同时收集样方内所有地上凋落物称取凋落物生物量。地上生物量测定完成后, 在样地中心位置的样方内挖取1个1 m×1 m×1 m的土壤剖面, 采用切块法^[25], 在3个垂直剖面上分层获取0~5、5~10、10~20、20~30、30~50、50~70、70~100 cm的土壤样品, 用于土壤pH的测定。同时, 使用100 cm³的环刀进行土壤容重的测定。土壤样品采集时, 对于土层深度不足1 m的样地, 土壤剖面挖掘至岩石出现为止, 共计采集土壤及容重样品各2809个, 带回实验室进行处理与分析。

1.2.2 室内分析 土壤样品室内剔除植物根系、家畜粪便等杂物, 阴干后采用常规方法用于土壤pH(水土比5:1)、电导率(水土比5:1)、有机碳的测定^[26]; 容重采用烘干法(105 $^{\circ}\text{C}$, 24 h)测定^[26], 其后土壤样品过2 mm筛获得土石比^[25]。

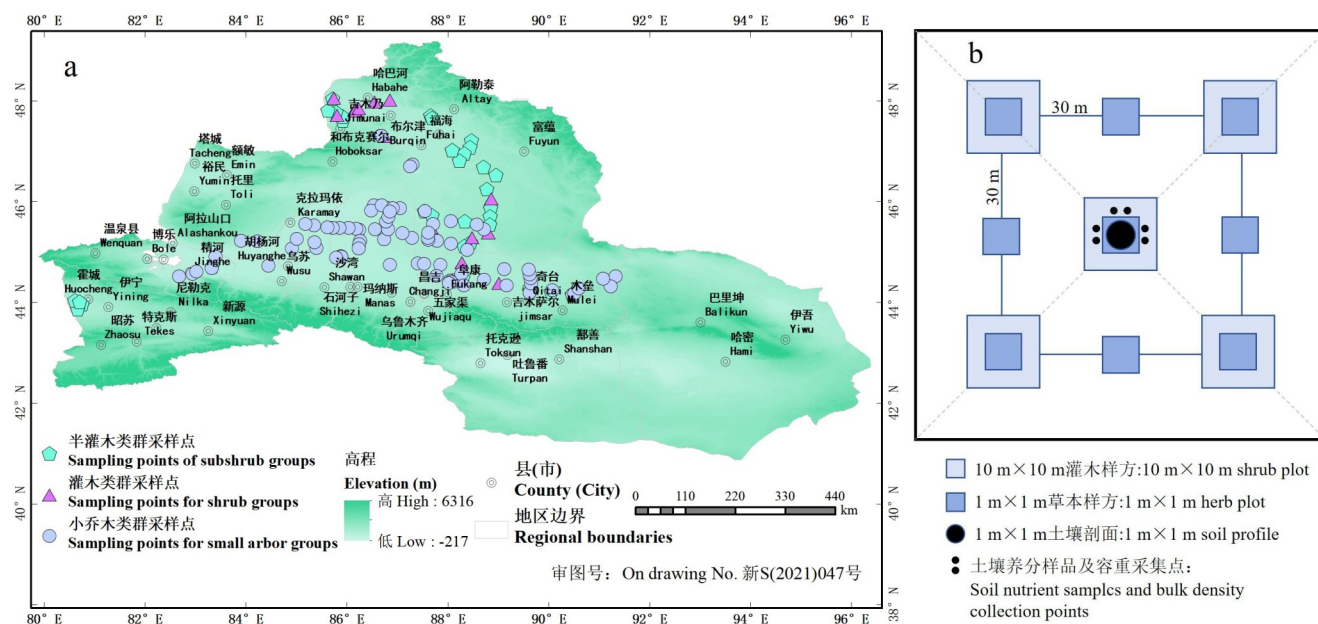


图1 野外样点分布及样地布设

Fig. 1 Distribution of field samples and plot layout

基于自然资源部标准地图服务网站新S(2021)047号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the new S(2021) No. 047 standard map of the standard map service website of the Ministry of Natural Resources, the boundaries of the base map have not been modified.

1.3 环境因素数据获取

气象数据是以1957—2023年35个新疆北部国家气象站点长期观测数据均值为基础(www.cnerm.org.cn),运用ArcGIS基于高程对气象数据进行克里金插值,并根据各采样点经纬度获取年均降水量、年均温度。2000—2023年雪水当量数据来源于全球陆面数据同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)中的NOAH陆面模型(<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>)。通过中国科学院计算机网络信息中心自主研发的科学数据中心(<https://www.scidb.cn/en>)获取2001—2020年中国大陆干旱监测与影响分析高分辨率标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)数据集,采用像元统计计算多年平均SPEI。

运用ArcGIS中3D Analyst工具对30 m空间分辨率新疆北部高程图像提取研究区各采样点坡度。1980—2022年表层(0~10 cm)、根区(10~100 cm)土壤湿度数据来源于全球陆地蒸发阿姆斯特丹模型(global land evaporation amsterdam model, GLEAM),其本质是一套算法,提供了土壤湿度、蒸发应力等数据集(<https://www.gleam.eu/>)。土壤砂粒(0.05~2.00 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)、黏粒(<0.002 mm)含量数据来源于联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)及其合作伙伴共同开发的世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)(<https://www.fao.org/soils-portal/en/>)。轨道碳卫星(orbiting carbon observatory-2, OCO-2)反演日光诱导叶绿素荧光(sun/solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)植被数据,通过立方体集成训练计算获得GOSIF数据^[27]。

1.4 数据分析

1.4.1 统计分析 按照调查样地植物群落优势种所属生活型,将调查的136个样地划分为小乔木类群、灌木类群、半灌木类群,依次包含87、15、34个样点。

采用Microsoft Excel 2013将数据预处理,用SPSS 20.0中的单因素方差分析、多重比较(Duncan)来检验各植被类型间、土层间pH的差异。

1.4.2 空间变异与分布特征分析 半变异函数:对土壤pH的空间变异特征进行量化处理,将土壤pH的空间变异与结构性因素、随机因素联系起来,探明其空间自相关性强弱以及最佳预测模型^[28],明确随着步长h的改变,土壤pH的空间分异规律。计算公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ 表示步长为h的半方差函数估计值, $N(h)$ 表示步长为h时全部离散点配对数, $Z(x_i + h)$ 与 $Z(x_i)$ 分别表示 $x_i + h$ 与 x_i 样点的平均密度。随着步长h增大,半变异函数基本平稳后,会出现5种关键参数,其中根据块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)比值大小可判断土壤pH空间自相关性强弱,比值小于0.25,说明随机变异占比小,空间自相关性强;比值为0.25~0.75时,说明随机变异逐渐增大,呈中等程度空间自相关;比值大于0.75,说明随机变异占比大,空间自相关性弱^[6]。

利用GS+ 9.0构建半变异函数,根据决定系数(R^2)最接近于1,残差(residual sum of squares, RSS)最接近于0,选择最优半变异函数理论模型及参数,为克里金插值作准备。

克里金插值法:对于土壤pH研究而言,其本质就是利用已知采样点土壤pH对周边区域未知土壤pH进行最优、无偏预测的地统计方法^[29],是现今地统计学空间插值运用最多、最优的内插法之一,其公式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中: $Z(x_0)$ 表示 x_0 样点上土壤pH的预测值, $Z(x_i)$ 代表 x_0 附近的136个实测采样点土壤pH, α_i 代表 x_i 与 x_0 之间地理空间相关权重系数。

以半变异函数最优模型及其参数为基础,构建土壤pH随空间变化函数,在无偏与最优等条件下构建克里金方程,获取权重系数,再与已知土壤pH进行线性重合^[30],然后计算准噶尔盆地沙质荒漠草地0~100 cm及各土层地理空间任意点土壤pH预测值,由点到面,最后绘制出空间分布图。

1.4.3 地理探测器 为揭示沙质荒漠土壤pH与环境因子之间的关系,采用地理探测器因子探测功能,分析海

拔(elevation, Ele)、坡度(slope, Slope)、年均温度(mean average temperature, MAT)、年均降水(mean average precipitation, MAP)、标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、雪水当量(snow water equivalent, SWE)、凋落物生物量(litter biomass, Litter)、地上生物量(above-ground biomass, AGB)、植被覆盖度(vegetation coverage, Cov)、物种丰富度指数(species richness index, SR)、平均叶绿素荧光值(average chlorophyll fluorescence value, SIF)、电导率(electrical conductivity, EC)、土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、容重(bulk density, BD)、土壤含水量(soil moisture content, SMC)、土石比(soil-rock ratio, SRR)、黏粒(clay)、粉粒(silt)、砂粒(sand)、根部土壤湿度(root soil moisture, RSM)、表层土壤湿度(surface soil moisture, SSM)共21个环境因子对土壤pH的解释力(q 值),数据可视化在Origin 9.0中完成。

因子探测公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

式中: N 代表全区单元数, σ^2 代表土壤pH全区方差, N_h 代表子类型区 h 单元数, σ_h^2 代表土壤pH子类型 h 区方差; q 值代表某因子对土壤pH变异程度解释力,区间为 $[0,1]$,值越大代表该因子对土壤pH变异情况解释力越大,值越小,则解释力越小^[6]。

2 结果与分析

2.1 沙质荒漠草地土壤pH频率分布和剖面特征

从0~100 cm土壤pH总体分布频率看(图2a),由136个采样点得到的2809个土壤pH偏度与峰度分别为0.19、-0.28,符合正态分布;土壤pH平均值、最大值、最小值、中位数、标准差分别为8.66、10.83、6.13、8.62、0.69,变异系数为7.97%,属弱变异。从剖面看(图2b),0~100 cm各土层土壤pH均值为8.54~8.76,且随土层深度增加呈增加趋势,可用幂函数拟合($R^2=0.96093$, $P<0.01$),其中0~5 cm土层pH(8.54)显著低于10~100 cm各土层,5~10 cm土层(8.61)显著低于70~100 cm土层(8.76) ($P<0.05$),而5~70 cm各土层间差异不显著。

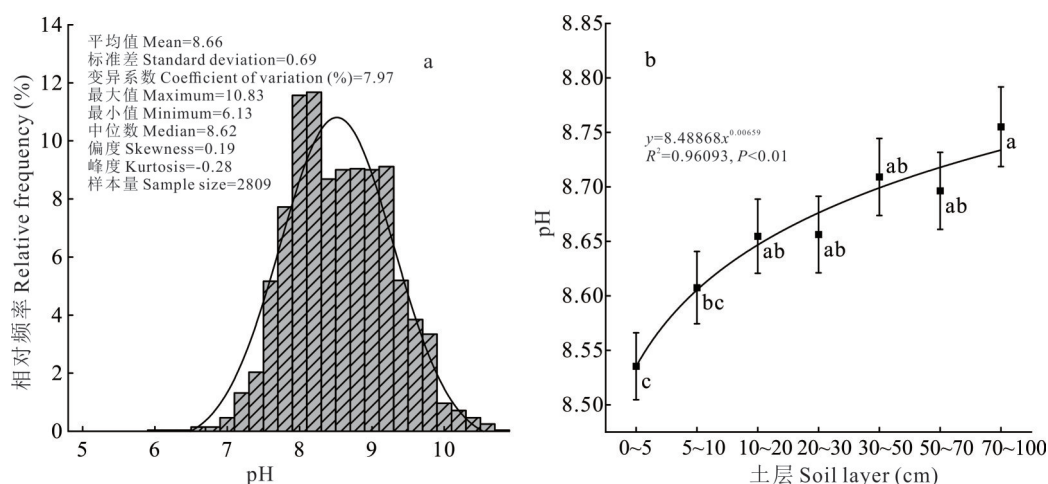


图2 沙质荒漠草地土壤pH频率分布和剖面特征

Fig. 2 Soil pH frequency distribution and profile characteristics in sandy desert grassland

不同小写字母代表不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters represent significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 不同植被类群土壤pH分布特征及差异分析

由图3看出,半灌木、灌木、小乔木类群0~100 cm土壤pH符合正态分布,其平均值分别为8.59、8.54、8.71,变异系数分别为8.38%、6.21%、8.04%,为弱变异。随土层深度增加,不同植被类群土壤pH均呈增大趋势,且

半灌木植被类群 0~5 cm 土层土壤 pH 显著低于 70~100 cm 土层 pH,小乔木植被类群则表现为 0~5 cm 土层土壤 pH 显著低于 20~100 cm 土层 pH($P<0.05$)。从植被类群看,小乔木类群土壤 pH 显著高于灌木类群 1.02 倍、半灌木类群 1.01 倍($P<0.05$),而灌木类群、半灌木类群间差异不显著(图 4a);从土层看仅 10~20 cm 土层小乔木 pH(8.74)显著高于灌木、半灌木($P<0.05$,图 4b)。

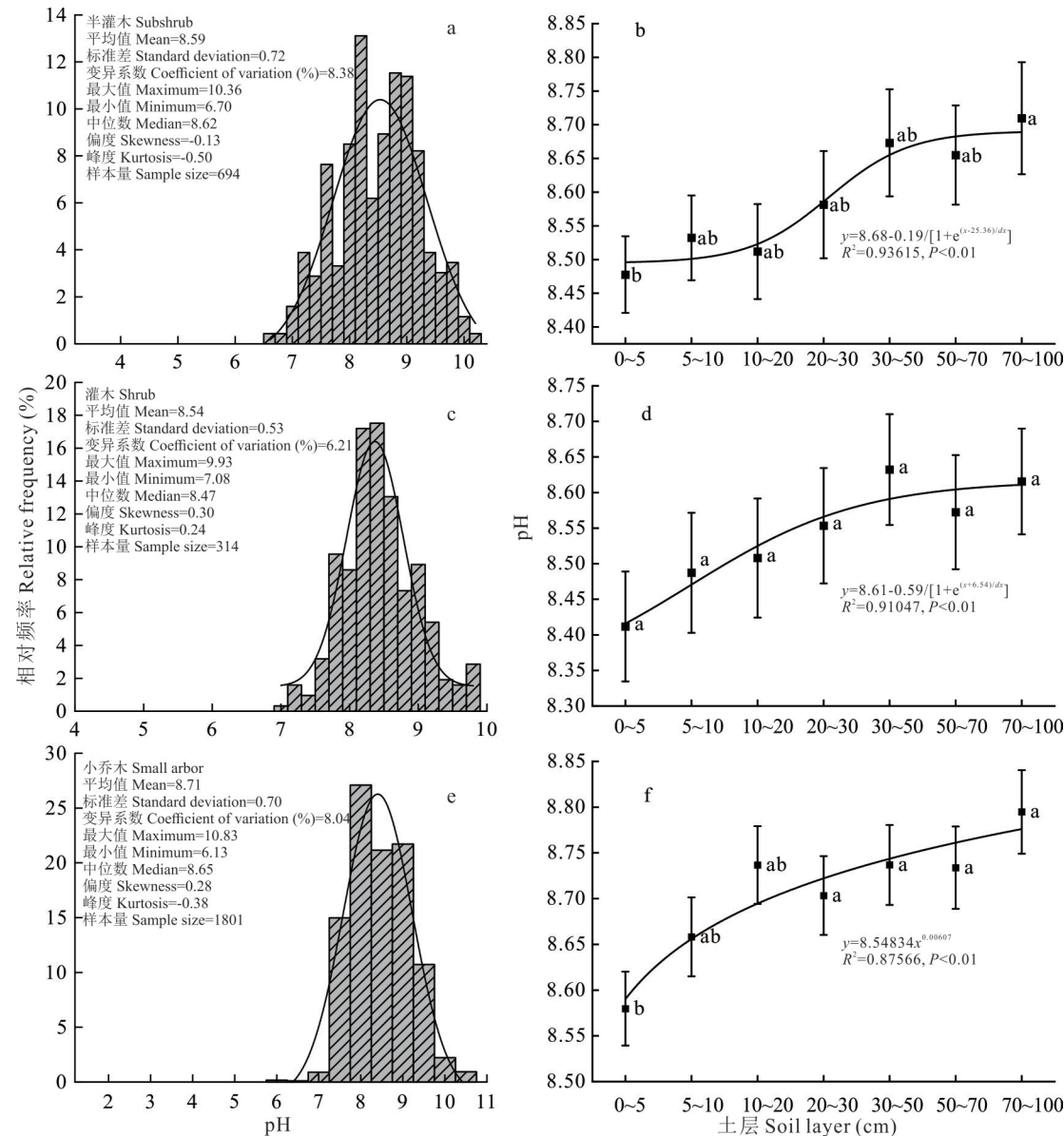


图3 不同植被类群间土壤 pH 频率分布和剖面特征
Fig. 3 Soil pH frequency distribution and profile characteristics among different vegetation groups

2.3 土壤 pH 特征的半方差变异函数分析

表 1 结果表明,除 5~10 cm(线性模型)、30~50 cm(线性模型)、70~100 cm(高斯模型)土层外,其余各土层及 0~100 cm 土层 pH 的半方差函数最佳拟合模型均为指数模型。0~100 cm 土层 pH 最佳模型的块金效应为 49.906%,属于中等程度空间自相关(25%~75%),主要由结构因素与随机因素共同影响,变程为 543.300 km,其空间自相关性范围较广。0~50 cm 土层 pH 最佳模型的块金效应均在 25%~75%,由结构因素与随机因素共同影响,50~100 cm 土层 pH 最佳模型块金效应为 2.500%、6.865%,属于强空间自相关性,受结构因素影响较大。

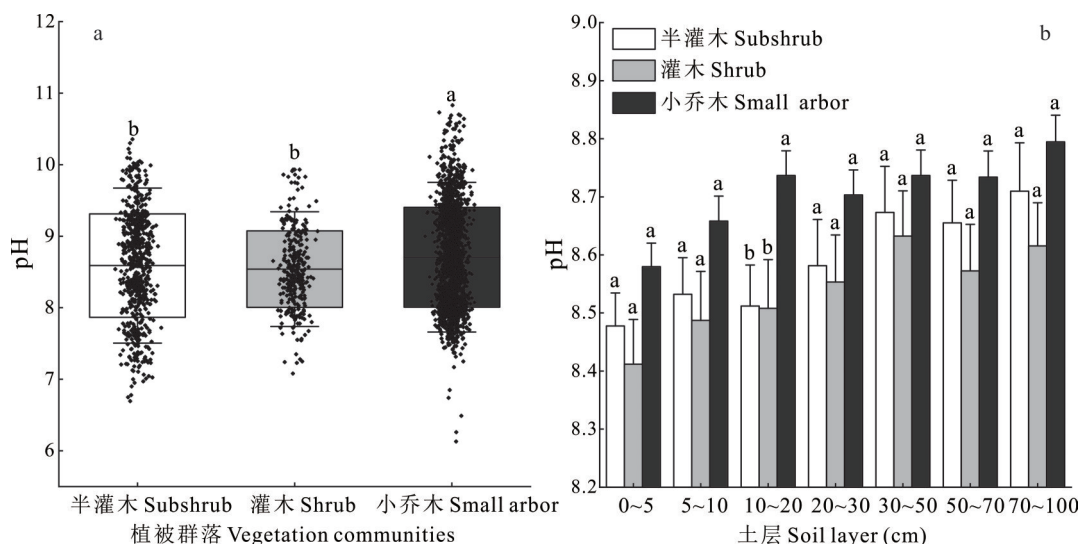


图4 不同植被类群间土壤pH的比较

Fig. 4 Comparison of soil pH among different vegetation groups

不同小写字母表示不同植被群落间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among different vegetation communities ($P < 0.05$).

2.4 沙质荒漠土壤pH空间分布格局

基于半方差模型参数,采用Kriging方法^[6]插值绘制的0~100 cm各土层pH空间分布图表明,沙质荒漠草地土壤基本以碱性土(pH为7.60~8.50),强碱性土(pH>8.50)为主(图5)。其中碱性土面积占比随土层深度增加呈递减趋势(图5a~g),由0~5 cm土层的32.87%(图5a)降低到70~100 cm土层的16.11%(图5g);强碱性土面积占比则呈递增趋势,由0~5 cm土层的67.13%(图5a)增至70~100 cm土层的83.89%(图5g)。从0~100 cm土层pH分布看,碱性土主要分布于准噶尔盆地周缘吉木乃县北部、福海县南部、和布克赛尔蒙古自治县南部、克拉玛依市北部等,面积占比为19.39%(图5h);强碱性土主要分布于阜康市、呼图壁县、玛纳斯县、富蕴县、北屯市、布尔津县、乌苏市、乌鲁木齐市等,其面积占比为80.61%(图5h)。

2.5 沙质荒漠土壤pH与主要环境生态因子关系分析

单因子探测结果表明(图6a),准噶尔盆地土壤pH空间变异主要受气候因子中的年均温度(MAT)、雪水当量(SWE),植被因子中的植被盖度(Cov)、物种丰富度指数(SR),土壤因子中的根部土壤湿度(RSM)的影响,其解释力(q 值)依次为0.159、0.085、0.152、0.066、0.076。从各类群看,半灌木植被类群土壤pH空间变异(图6b)主要受土壤因子中的容重(BD)、电导率(EC),气候因子中的年均温度(MAT)、雪水当量(SWE),地形因子中的坡度(Slope)影响较大,其 q 值分别为0.196、0.145、0.189、0.188、0.140。灌木植被类群土壤pH空间变异(图6c)主要受土壤因子中的容重(BD),地形因子中的坡度(Slope),气候因子中的年均降水量(MAP)、雪水当量(SWE),以及植被因子中的地上生物量(AGB)影响较大,其 q 值分别为0.797、0.792、0.639、0.458、0.480。小乔木植被类群土壤pH空间变异(图6d)主要受植被因子中的盖度(Cov)、物种丰富度指数(SR),地形因子中的坡度(Slope),土壤因子中的土壤含水量(SMC)、表层土壤湿度(SSM)影响较大,其 q 值分别为0.283、0.265、0.171、0.161、0.139。

3 讨论

3.1 准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤pH分布特征

研究表明,准噶尔盆地沙质荒漠草地0~100 cm土层pH呈逐渐增高趋势,且各土层间存在显著性差异(图2b),与李浙华等^[31]在古尔班通古特固定半固定沙垄0~30 cm土层pH垂直分布结果一致。这可能是因为0~10 cm土层更易接受降水,特别是雪水淋溶会造成盐基离子下渗,表层 H^+ 浓度增加,导致表层土壤pH降低,深层土

表 1 沙质荒漠草地土壤 pH 半方差函数模型及参数

Table 1 Half-variance function model and parameters of soil pH in sandy desert grassland

土层 Soil layer (cm)	模型 Model	块金值 Nugget value (C_0)	基台值 Abutment value (C_0+C)	块金效应 Nugget effect [$C_0/(C_0+C)$, %]	变程 Range (km)	决定系数 Coefficient of deter- mination (R^2)	残差 Residuals (RSS)
0~5	指数 Index	0.211	0.474	44.618	488.100	0.918	3.247×10^{-3}
	线性 Linear	0.235	0.417	56.256	210.817	0.899	4.026×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.255	0.510	49.902	345.025	0.858	5.920×10^{-3}
	球状 Globosity	0.022	0.338	6.509	19.200	0.190	0.0322
5~10	指数 Index	0.307	0.751	40.879	1141.200	0.823	7.837×10^{-3}
	线性 Linear	0.318	0.503	63.254	210.817	0.826	7.709×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.071	0.419	16.945	12.817	0.063	0.0415
	球状 Globosity	0.043	0.419	10.263	15.000	0.063	0.0415
10~20	指数 Index	0.300	0.600	49.917	502.200	0.923	3.696×10^{-3}
	线性 Linear	0.329	0.528	62.340	210.817	0.887	5.403×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.067	0.444	15.090	16.281	0.268	0.0351
	球状 Globosity	0.036	0.444	8.108	19.400	0.268	0.0351
20~30	指数 Index	0.306	0.678	45.133	633.300	0.945	3.201×10^{-3}
	线性 Linear	0.330	0.555	59.400	210.817	0.938	3.583×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.065	0.458	14.192	15.935	0.216	0.0456
	球状 Globosity	0.033	0.458	7.205	18.900	0.216	0.0456
30~50	指数 Index	0.346	0.750	46.133	835.200	0.881	6.271×10^{-3}
	线性 Linear	0.362	0.571	63.465	210.817	0.885	6.040×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.078	0.483	16.149	16.628	0.321	6.271×10^{-3}
	球状 Globosity	0.040	0.483	8.282	19.900	0.321	0.0358
50~70	指数 Index	0.010	0.400	2.500	15.600	0.999	4.422×10^{-6}
	线性 Linear	0.349	0.412	84.529	65.494	0.640	9.083×10^{-4}
	高斯 Gauss	0.029	0.400	7.250	12.644	0.996	1.102×10^{-5}
	球状 Globosity	0.001	0.400	0.250	14.900	0.996	1.057×10^{-5}
70~100	指数 Index	0.019	0.447	4.251	32.100	0.980	4.325×10^{-4}
	线性 Linear	0.296	0.471	62.809	65.555	0.600	8.061×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.030	0.437	6.865	18.360	0.996	8.989×10^{-5}
	球状 Globosity	0.002	0.437	0.458	22.800	0.995	8.989×10^{-5}
0~100	指数 Index	0.264	0.530	49.906	543.300	0.910	3.099×10^{-3}
	线性 Linear	0.290	0.456	63.680	210.817	0.873	4.293×10^{-3}
	高斯 Gauss	0.700	0.388	18.040	18.706	0.482	0.0180
	球状 Globosity	0.029	0.388	7.470	22.300	0.481	0.0180

壤 pH 相对升高^[32-33]。从植被类群看(图 4a),3 种不同植被类群间 0~100 cm 土层 pH 存在显著差异,其中小乔木植被类群(梭梭、白梭梭)土壤 pH 显著高于灌木(多种沙拐枣、麻黄)与半灌木(驼绒藜、多种假木贼、沙漠绢蒿等)。一方面可能是因为小乔木相比于半灌木与灌木具有较大和较密的冠幅,这会截留更多被风沙携带来的粉状尘土^[34],这些尘土中含有较多盐基离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+})^[35],经过降水的洗刷,这些碱性离子会随雨水进入土壤,使得盐基饱和度上升,土壤 pH 增大。另一方面可能是因为小乔木生长区相较半灌木与灌木生长区,温度更高降水更少,这种干旱气候会增加植被地下生物量分配比例^[36-37],且有研究发现小乔木(梭梭)根系中的盐基离子(Na^{+} 、

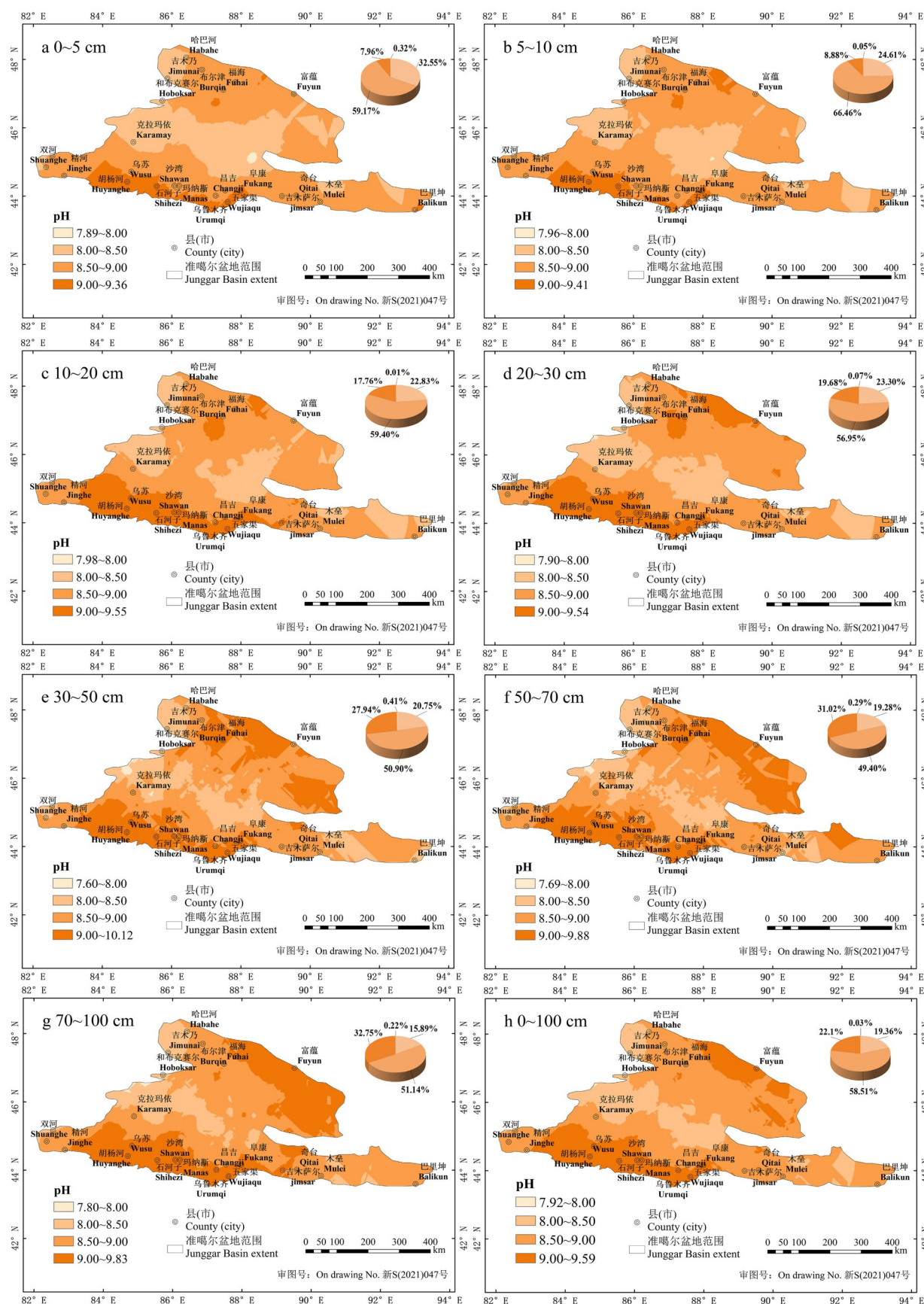


图5 沙质荒漠草地土壤pH空间分布格局

Fig. 5 Spatial distribution pattern of soil pH in sandy desert grassland

基于自然资源部标准地图服务网站新S(2021)047号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the new S (2021) No. 047 standard map of the standard map service website of the Ministry of Natural Resources, the boundaries of the base map have not been modified.

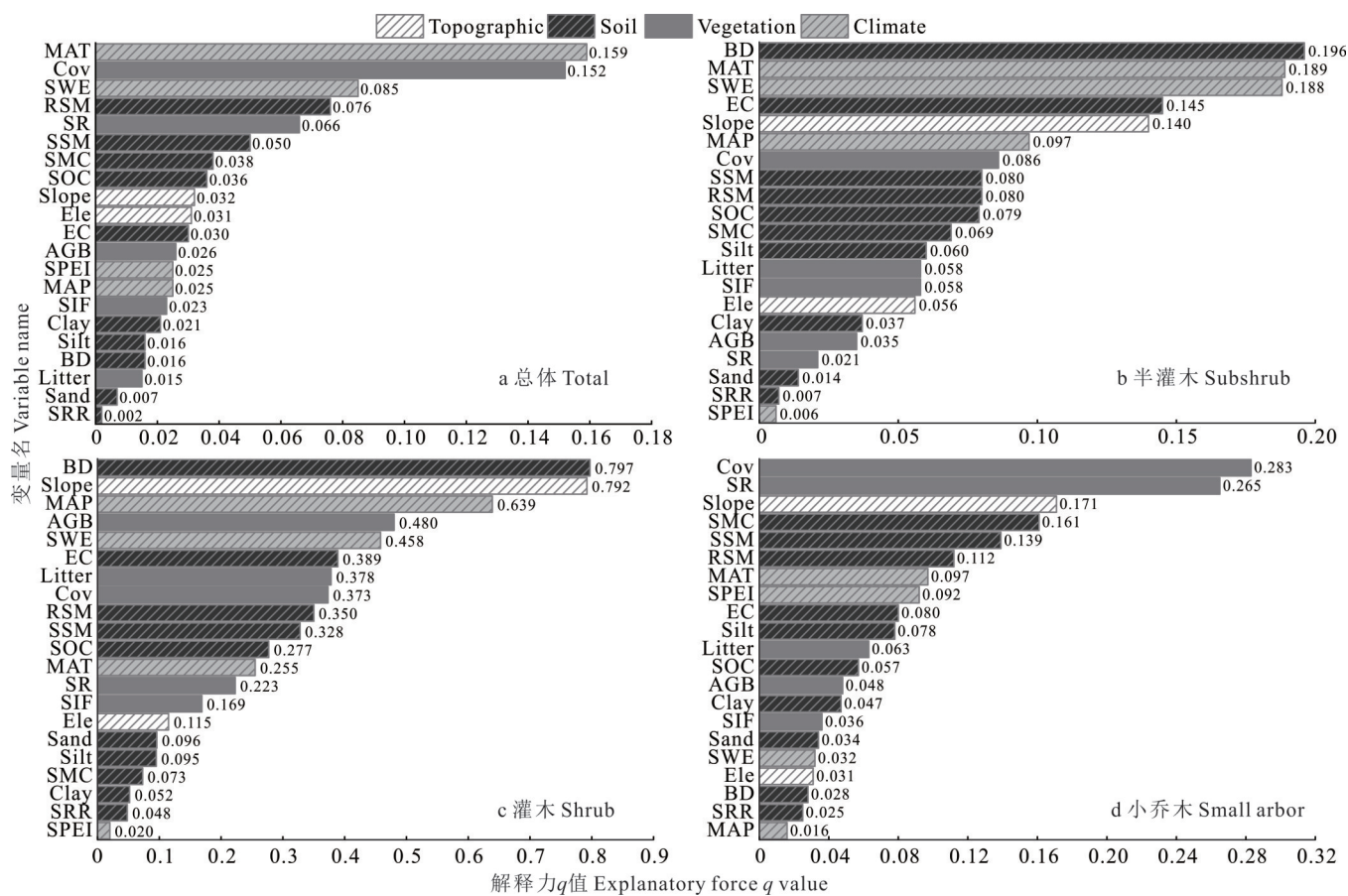


图6 沙质荒漠草地土壤 pH 空间变异影响因素地理探测结果

Fig. 6 Geographical detection results of influencing factors on spatial variation of soil pH in sandy desert grassland

Ele: 海拔 Elevation; Slope: 坡度; MAP: 年均降水量 Mean average precipitation; MAT: 年均温度 Mean average temperature; SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; SWE: 雪水当量 Snow water equivalent; Litter: 凋落物生物量 Litter biomass; AGB: 地上生物量 Above-ground biomass; Cov: 植被覆盖度 Vegetation coverage; SR: 物种丰富度指数 Species richness index; SIF: 平均叶绿素荧光值 Average chlorophyll fluorescence value; EC: 电导率 Electrical conductivity; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; BD: 土壤容重 Bulk density; SMC: 土壤含水量 Soil moisture content; SRR: 土石比 Soil-rock ratio; Clay: 黏粒; Silt: 粉粒; Sand: 砂粒; RSM: 根部土壤湿度 Root soil moisture; SSM: 表层土壤湿度 Surface soil moisture; Topographic: 地形; Soil: 土壤; Vegetation: 植被; Climate: 气候.

K^+)要高于灌木(沙拐枣)^[38]。因此推测小乔木会向地下土壤中输送更多的由根系分泌或腐败分解产生的盐基离子,使得土壤 pH 升高。

准噶尔盆地沙质荒漠草地 0~100 cm 土层土壤 pH 主要以碱性土($7.5 < \text{pH} < 8.5$)、强碱性土($\text{pH} > 8.5$)为主,且多集中在研究区周缘县(市),占地面积分别为 19.39% 与 80.61%(图 5h),这与李从娟等^[39]、王文帆等^[40]在古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠研究结果一致。以上研究成果均符合我国土壤 pH 在地理分布上呈南酸北碱的分布规律^[6]。从半方差分析看(表 1),0~100 cm 土层土壤 pH 最佳模型为指数模型,块金效应为 49.906%,为中等程度空间自相关,表明其空间变异由结构性因素(气候、地形、植被、土壤理化因子等)与随机因素(过牧、采挖、多种土地利用方式等)共同决定。其中结构性因素中年均温度、年均雪水当量对总体土壤 pH 影响较大,其次是植被因子,然后是土壤理化因子与地形因子(图 6a)。

3.2 准噶尔盆地沙质荒漠草地土壤 pH 分布影响因素

准噶尔盆地沙质荒漠草地总体(图 6a)与半灌木植被群落(图 6b)土壤 pH 主要影响因素交集为年均温度、雪水当量。其中年均温度对土壤 pH 的影响存在两个方面,一方面高温干旱会造成荒漠草地地下深层水分蒸发量增高,其中盐分会伴随水蒸气或毛细管作用由深层土过滤上升到浅层土^[41],这是深层土 pH 显著高于表层土的原因之一(图 2b 与图 5a~g),也是研究区土壤 pH 均为碱性、强碱性以及发生空间变异的主要原因之一。另一方面,气

温上升会进一步加剧沙质荒漠土壤风化程度,盐基离子随之解放,最终土壤pH因其含量的上升而增加^[42-43]。有研究表明,雪水是准噶尔盆地植被生存主要水源之一^[44],古尔班通古特沙漠作为研究区重要组成部分,其在冬季有较厚的积雪,春季升温积雪融化,一方面雪水淋溶冲刷,会直接造成土壤盐分离子分布变异^[44-45],另一方面会通过影响研究区主要优势种包括梭梭、白梭梭、多种沙拐枣、假木贼等植被类群生长发育,从而间接影响土壤pH变异规律。

准噶尔盆地沙质荒漠总体(图6a)与小乔木(图6d)植被群落土壤pH主要影响因素交集为植被盖度、物种丰富度。伴随盖度增大,植被对于地面的覆盖保护越好,其会对降水进行短暂截留并进行再分配,与周围裸地相比不容易形成地表径流,盐基离子淋溶下渗程度相对较轻,且本研究采样时间6—8月正值荒漠植被生长期,气温高植被蒸腾作用加剧,降水会被沙质荒漠植被大量吸收,土壤中的水分含量反而会低于附近裸地沙丘^[46-47],土壤含水量较少,温度升高,地下水分蒸发量增加,盐基离子会随着水蒸气向地表方向移动,最终使得土壤pH升高^[31,41]。植被盖度越低,凋落物、地上地下生物量、根系与叶片分泌物以及对于粉尘的拦截都会减少,这会直接降低土壤中盐基离子的输入,继而减小土壤pH^[31,48]。

半灌木(图6b)与灌木(图6c)植被群落土壤pH的主要影响因素交集包含坡度、容重以及电导率。这可能是由于随着坡度增加,降水更容易造成土壤侵蚀现象的发生,植被上截获的碱性粉尘会伴随土壤中的少数黏粒与粉粒一同被冲刷流失,造成土壤盐基离子减少,土壤pH降低^[49]。另一方面,随着土壤容重的增加,土壤孔隙度减小,水分渗透速率降低^[50],土壤盐基离子下渗受到较大阻碍,土壤pH随之增大。土壤电导率是衡量土壤盐渍化的重要指标,电导率越高,盐渍化程度越高,其中虽然包括部分盐基离子,但盐渍化过于严重会直接造成植被覆盖大幅度降低,总的来看可能反而会阻碍土壤碱性离子的总量输入,导致土壤pH降低^[51-52]。

半灌木(图6b)与灌木(图6c)两种植被类群土壤pH最强影响因子均是土壤容重,而小乔木(图6d)植被类群最强影响因子则是植被覆盖度。土壤容重与植被盖度均为土壤pH重要驱动因素,出现以上差异可能是不同植被类群生存环境差异过大造成的。如本研究中半灌木与灌木类群多数分布于阿勒泰地区,有研究发现该区域土壤容重较高,荒漠区植被退化稀疏,覆盖度相应降低^[21,53],这可能造成土壤容重较高引起的土壤盐基离子保存效果要高于植被对盐基离子进行输入效果,最终造成土壤容重对于土壤pH分布变异解释力高于其他因子,小乔木植被类群则与其相反,小乔木类群主要优势种梭梭与白梭梭,相比半灌木与灌木类群植被具有较大冠幅,因此通过拦截粉尘土^[34],降低雨水对土壤的淋溶^[49],进而影响土壤pH的空间变异。不同植被类群下土壤pH影响因素产生差异还可能与其所在地理空间分布的差异相关。若将半灌木、灌木类群采样点分别大致连接(图1),发现其均表现为自北向南多数散落分布于阿勒泰地区,少数临近昌吉回族自治州,在此方向上,纬度跨度较大,经度跨度较小,年均气温、年均降水量与雪水当量均存在较大差异^[54-55],可能会直接影响土壤pH分布特征;而小乔木则大多自西向东散落分布于准噶尔盆地南部各县市周边,分布特点为纬度跨度较小,经度跨度较大,可能在各类气象因子上相比半灌木、灌木类群波动较小,导致各类气象因子对小乔木类群土壤pH影响力偏小,因此产生了半灌木、灌木类群与小乔木类群土壤pH环境影响因素上的差异。

4 结论

新疆准噶尔盆地沙质荒漠草地0~100 cm各土层土壤pH均值为8.54~8.76,均属弱变异;不同植被群落中,0~100 cm土层土壤pH表现为灌木类群(8.54)<半灌木类群(8.59)<小乔木类群(8.71)。

空间分布方面,碱性土主要分布于准噶尔盆地周缘吉木乃县北部、福海县南部,克拉玛依市北部等地区,强碱性土主要分布于阜康市、呼图壁县、玛纳斯县、富蕴县等地区。

半方差函数分析表明0~100 cm土层pH块金效应为49.91%,属于中等程度空间自相关,在空间变异上由结构因素与随机因素共同影响。在结构性因素中,准噶尔盆地沙质荒漠土壤pH总体上受年均温度、植被覆盖度、雪水当量、根部土壤湿度、物种丰富度指数影响,且不同植被群落其调控因素并不一致,需要区别对待。

参考文献 References:

- [1] Lindroos A J, Derome J, Raitio H, *et al.* Heavy metal concentrations in soil solution, soil and needles in a norway spruce stand on an acid sulphate forest soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 180(1/2/3/4): 155—170.
- [2] Xue W, Bezemer M T, Berendse F. Soil heterogeneity and plant species diversity in experimental grassland communities: contrasting effects of soil nutrients and pH at different spatial scales. *Plant and Soil*, 2019, 442(1/2): 497—509.
- [3] Zhang W, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatial variability of soil pH and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin—a case study from Renshou in Sichuan. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1192—1199.
张维, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤pH空间变异及影响因素分析——以四川仁寿县为例. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1192—1199.
- [4] Wu Z X, Zhou Y, Muhtar•Amat, *et al.* Spatial variability of soil pH value and its influencing factors in the soil layer of northwestern Hubei Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(2): 488—498.
吴正祥, 周勇, 木合塔尔·艾买提, 等. 鄂西北山区耕层土壤pH值空间变异特征及其影响因素研究. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(2): 488—498.
- [5] Wen H T, Dong Q Y, Wang P, *et al.* Spatial variation characteristics and influencing factors of soil pH value at the northern foot of Tongbai Mountain. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 295—305.
温皓天, 董秋瑶, 王攀, 等. 桐柏山北麓土壤pH值空间分布特征及其影响因素. *土壤通报*, 2023, 54(2): 295—305.
- [6] Chen Q X, Lu X H, Tu C L. Spatial variation and influencing factors of soil pH in Anshun City. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2124—2132.
陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙. 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析. *环境科学*, 2022, 43(4): 2124—2132.
- [7] Gao P, Yang X M, Li D N, *et al.* Distribution characteristics of soil pH in cultivated land in Qinling-Bashan area and its influencing factors. *Journal of Agriculture*, 2023, 13(8): 32—36.
高鹏, 杨小敏, 李丹妮, 等. 秦岭巴山区耕地土壤pH分布特征及其影响因素. *农学学报*, 2023, 13(8): 32—36.
- [8] Huang H Q, Zhang H, Hu Z, *et al.* Spatial distribution and influencing factors of arable soil organic matter and pH in mountainous areas of Guizhou. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(11): 2473—2479.
黄会前, 张慧, 胡震, 等. 贵州山区耕地土壤有机质及pH的空间分布与影响因素研究. *西南农业学报*, 2023, 36(11): 2473—2479.
- [9] Deng Q, Fang H Y, Zhang Y Y, *et al.* Spatial variability of cropland soil pH and its influencing factors in Sichuan Basin. *Soils*, 2022, 54(6): 1283—1290.
邓茜, 方红艳, 张元媛, 等. 四川盆地耕地土壤pH空间变异特征及影响因素. *土壤*, 2022, 54(6): 1283—1290.
- [10] Palpurina S, Wagner V, Wehrden V H, *et al.* The relationship between plant species richness and soil pH vanishes with increasing aridity across Eurasian dry grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(4): 425—434.
- [11] Zhao X, He C, Liu W S, *et al.* Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 2021, 28(1): 154—166.
- [12] Li J, Zhang L C, Zhang M Q, *et al.* Characteristics and prediction of topsoil acidification of latosolic red soil caused by long-term urea application. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2161—2171.
李娟, 张立成, 章明清, 等. 长期施用尿素降低赤红壤旱地耕层pH的特征与预测. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(12): 2161—2171.
- [13] Liang G H, Wu J P, Xiong X, *et al.* Responses of soil pH value and soil microbial biomass carbon and nitrogen to simulated acid rain in three successional subtropical forests at Dinghushan Nature Reserve. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 911—918.
梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤pH值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 911—918.
- [14] Li Z Y, Liu Z C, Yan C, *et al.* The biomass-diversity relationship depends upon soil pH variations in Inner Mongolian grasslands: Insight from comparison between gradient observations and manipulative experiments. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(1): 38—49.
李子雁, 刘尊驰, 鄢创, 等. 内蒙古草原不同土壤pH条件下植物生物量和多样性的关系: 样带调查和控制实验的比较研究. *草业学报*, 2020, 29(1): 38—49.
- [15] Xu P. *Grassland resources and their utilization in Xinjiang*. Urumqi: Xinjiang Science and Technology and Health Press, 1993.

- 许鹏. 新疆草地资源及其利用. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993.
- [16] Diao M J, Xia C Z. Analysis on the change of vegetation growth in Junggar Basin during 1982—2013. *Forest Resources Management*, 2016(5): 39—46.
刁鸣军, 夏朝宗. 1982—2013年准噶尔盆地植被长势变化分析. *林业资源管理*, 2016(5): 39—46.
- [17] Wang J P, Guo Z J, Huang J H, *et al.* Characteristics of spatio-temporal variation of NDVI in different ecological function zones in north Xinjiang in recent 30 years. *Forest Resources Management*, 2015(6): 64—70.
王计平, 郭仲军, 黄继红, 等. 北疆不同生态功能区近30年来植被盖度时空变化. *林业资源管理*, 2015(6): 64—70.
- [18] Yang J, Sun Z J, Chai Y. Effects of enclosure on vegetation characteristics and stability of sandy desert grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(3): 65—71, 108.
杨静, 孙宗玖, 柴艳. 封育对沙质荒漠草地植被特征及稳定性影响. *中国草地学报*, 2017, 39(3): 65—71, 108.
- [19] Yang J, Sun Z J, Bademu qiqige, *et al.* Effects of enclosure years on vegetation functional groups diversity and soil total nutrients characters of sandy desert grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(4): 102—110.
杨静, 孙宗玖, 巴德木其其格, 等. 封育对草地植被功能群多样性及土壤养分特征的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(4): 102—110.
- [20] Liu H X, Sun Z J, Shi Y K, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon in *Haloxylon* sandy desert in Junggar Basin. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(11): 147—155.
刘慧霞, 孙宗玖, 石宇堃, 等. 准噶尔盆地梭梭沙质荒漠土壤有机碳分布特征的研究. *中国农业科技导报*, 2021, 23(11): 147—155.
- [21] Liu H X, Sun Z J, Cui Y X, *et al.* Spatial distribution pattern and impact factors of soil bulk density in desert grassland of northern Xinjiang. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(2): 82—91.
刘慧霞, 孙宗玖, 崔雨萱, 等. 新疆北疆荒漠草地土壤容重空间分布格局及其影响因素. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 82—91.
- [22] Zhang L, Lv G H, Jiang L M, *et al.* Analysis on soil driving force affecting biomass distribution of desert plants in Ebinur Lake basin. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2019, 28(3): 12—18.
张磊, 吕光辉, 蒋腊梅, 等. 影响艾比湖流域荒漠植物生物量分布的土壤驱动力分析. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(3): 12—18.
- [23] Zheng L L, Xiong H G, Xia Q R, *et al.* Physical and chemical differences of 11 vegetation-soil types in southern Gurbantunggut Desert. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35): 245—253.
郑丽丽, 熊黑钢, 夏倩柔, 等. 古尔班通沙漠南缘11种植被的土壤理化差异性研究. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 245—253.
- [24] Marhaba•Nigat, Dai Y, Shi Q D, *et al.* Physical and chemical properties of soil at southeastern edge of *Anabasis salsa* in Junggar Basin. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(7): 38—44.
麦尔哈巴•尼加提, 戴岳, 师庆东, 等. 准噶尔盆地东南缘荒漠灌丛盐生假木贼周围土壤理化性质研究. *灌溉排水学报*, 2019, 38(7): 38—44.
- [25] Liu H X, Dong Y Q, Cui Y X, *et al.* Environmental factors influencing soil organic carbon and its characteristics in desert grassland in Altay, Xinjiang. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 41—52.
刘慧霞, 董乙强, 崔雨萱, 等. 新疆阿勒泰地区荒漠草地土壤有机碳特征及其环境影响因素分析. *草业学报*, 2021, 30(10): 41—52.
- [26] Bao S D. *Soil agrochemical analysis (The Third Edition)*. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
鲍士旦. *土壤农化分析(第三版)*. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [27] Li X, Xiao J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 517.
- [28] Hegde R, Bardhan G, Niranjana V K, *et al.* Spatial variability and mapping of selected soil properties in Kaligaudanahalli microwatershed, Gundlupet Taluk, ChamaraJanagar district, under hot semi arid agrosubregion of Central Karnataka Plateau, India. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(6): 1—15.
- [29] Bhattacharjee S, Mitra P, Ghosh K S. Spatial interpolation to predict missing attributes in GIS using semantic kriging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4771—4780.
- [30] Jia Z Y, Zhang J H, Ding S Y, *et al.* Spatial variation of soil phosphorus in flooded area of the Yellow River based on GIS and geo-statistical methods: A case study in Zhoukou City, Henan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4):

- 1211—1220.
- 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于 GIS 和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异——以周口为例. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1211—1220.
- [31] Li Z H, Li S Y, Li B W, *et al.* Spatial variation of soil chemical properties of longitudinal dunes with different vegetation coverage levels. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 160—167.
- 李浙华, 李生宇, 李丙文, 等. 不同植被覆盖度沙垄土壤化学性质的空间分异. 干旱区研究, 2020, 37(1): 160—167.
- [32] Medeiros S A, Drezner D T. Vegetation, climate, and soil relationships across the Sonoran Desert. *Ecoscience*, 2012, 19(2): 148—160.
- [33] Li C J, Lei J Q, Xu X W, *et al.* Spatial pattern for soil water and chemical properties in Gurbantunggut Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4380—4389.
- 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布. 生态学报, 2014, 34(15): 4380—4389.
- [34] Pei S, Fu H, Wan C, *et al.* Observations on changes in soil properties in grazed and nongrazed areas of Alxa Desert Steppe, Inner Mongolia. *Arid Land Research and Management*, 2006, 20(2): 161—175.
- [35] Wezel A, Rajot J, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(4): 383—398.
- [36] Liu Z T, Cui Y Y, Bai L, *et al.* Effects of simulated precipitation on aboveground and belowground biomass and their allocation proportion of plant community in desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1632—1639.
- 刘倬彤, 崔媛媛, 白柳, 等. 模拟降水变化对荒漠草原地上、地下生物量及其分配比例的影响. 草地学报, 2023, 31(6): 1632—1639.
- [37] Liu M, Ma Z L. Responses of biomass allocation to simulated warming in an alpine scrubland of eastern Qinghai—Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1421—1430.
- 刘美, 马志良. 青藏高原东部高寒灌丛生物量分配对模拟增温的响应. 生态学报, 2021, 41(4): 1421—1430.
- [38] Zhou Z B, Xu X W. Absorption characteristics of ions in three species of shrubs of the artificially-planted greenbelts in the hinterland of Taklamakan Desert. *Arid Zone Research*, 2002, 19(1): 49—52.
- 周智彬, 徐新文. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地三种灌木的离子吸收特性. 干旱区研究, 2002, 19(1): 49—52.
- [39] Li C J, Li Y, Ma J. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut Desert. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 302—310.
- 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. 土壤学报, 2011, 48(2): 302—310.
- [40] Wang W F, Liu R T, Guo Z X, *et al.* Physical and chemical properties and fractal dimension distribution of soil under shrubs in the southeastern area of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1): 209—218.
- 王文帆, 刘任涛, 郭志霞, 等. 腾格里沙漠东南缘固沙灌丛土壤理化性质及分形维数. 中国沙漠, 2021, 41(1): 209—218.
- [41] Liu G M, Yang J S, Li D S. Evaporation regularity and its relationship with soil salt. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 384—389.
- 刘广明, 杨劲松, 李冬顺. 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系. 土壤学报, 2002, 39(3): 384—389.
- [42] Department of Agriculture and Rural Affairs of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Xinjiang soil*. Beijing: Science Press, 1996.
- 新疆维吾尔自治区农业农村厅. 新疆土壤. 北京: 科学出版社, 1996.
- [43] Zuo L N, Chen J, Zhang H, *et al.* Patterns and drivers of soil pH on the Xinjiang temperate steppe. *Pratacultural Science*, 2022, 39(7): 1341—1353.
- 左李娜, 陈静, 张慧, 等. 新疆温性草原土壤 pH 特征及影响因素. 草业科学, 2022, 39(7): 1341—1353.
- [44] Huang P Y, Pan W B, Li H T, *et al.* The feedback of desert plants on the spatial pattern of snowmelt in Zhunger Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1992, 16(4): 346—353.
- 黄培祐, 潘伟斌, 李海涛, 等. 准噶尔盆地荒漠灌丛对融雪水空间分布的反馈初探. 植物生态学报, 1992, 16(4): 346—353.
- [45] Zhou H F, Li Y, Tang Y, *et al.* The Characteristics of the snow-cover and snowmelt water storage in Gurbantunggut Desert. *Arid Zone Research*, 2009, 26(3): 312—317.
- 周宏飞, 李彦, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠的积雪及雪融水储存特征. 干旱区研究, 2009, 26(3): 312—317.
- [46] Hao X T, Huang Y R, Ma Y B, *et al.* Study on soil moisture dynamics in growing season of sand-fixing *Haloxylon*

- ammodendron* forest in Ulan Buhe Desert. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(7): 187–196.
- 郝需婷, 黄雅茹, 马迎宾, 等. 乌兰布和沙漠固沙梭梭林生长季土壤水分动态研究. 中国农业科技导报, 2023, 25(7): 187–196.
- [47] Xi J Q, Yang Z H, Guo S J, *et al.* Effects of *Haloxylon ammodendron* planting on soil physico-chemical properties and soil microorganisms in sandy dunes. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(5): 44–52.
- 席军强, 杨自辉, 郭树江, 等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响. 草业学报, 2015, 24(5): 44–52.
- [48] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of ‘fertile islands’ in the desert ecosystem. Journal of Arid Environments, 1989, 16(3): 257–262.
- [49] Chen F, Pan Z, Zhai Y M, *et al.* The effect of erosive precipitation on physical and chemical properties of soil in different slopes. Soil and Water Conservation in China, 2024(3): 55–60.
- 陈凤, 潘政, 翟亚明, 等. 不同坡度下侵蚀性降水对土壤理化性质的影响. 中国水土保持, 2024(3): 55–60.
- [50] Zhang X L, Feng M D, He B H, *et al.* Soil infiltration characteristics and suitable models under different land use types in Karst Trough-Valley region. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 34–41.
- 张贤林, 冯梦蝶, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同土地利用方式下土壤入渗特征及适宜模型. 水土保持研究, 2024, 31(4): 34–41.
- [51] Zhang F, Li Y B, Wang D F, *et al.* Analysis of distribution patterns and spatial variability of soil salinity affecting factors in topsoil layer of salinized soil in Jinghe Oasis. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(1): 64–73.
- 张飞, 李怡博, 王东芳, 等. 精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 64–73.
- [52] Farifteh J, Farshad A, George R. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. Geoderma, 2005, 130(3): 191–206.
- [53] Ping X Y, Lin C C, Bai Y, *et al.* The ecological effects of planting *Apocynum venetum* in the plain desert of the Altay Region, Xinjiang Province. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 49–58.
- 平晓燕, 林长存, 白宇, 等. 新疆阿勒泰平原荒漠罗布麻种植区的生态效益评价. 草业学报, 2014, 23(2): 49–58.
- [54] Zhang Y, Chu X Z, Yang S M, *et al.* Climate change in north Xinjiang in recent 56 years. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 212–219.
- 张扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近 56 a 新疆北部地区气候变化特征. 干旱区研究, 2019, 36(1): 212–219.
- [55] Hu L Q, Huang W J, Yin K Q, *et al.* Estimation of snow water resources and its distribution in Xinjiang. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 326–332.
- 胡列群, 黄慰军, 殷克勤, 等. 新疆冬季雪水资源估算及分布特征. 水科学进展, 2013, 24(3): 326–332.