DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.05.011

适应水土资源条件的华北地区农业种植布局研究

黄峰[1]，杨晓琳[2]，方瑜[2]，王素芬[2]，康绍忠[2]

（1. 中国农业大学土地科学与技术学院，北京 100193；2. 中国农业大学水利与土木工程学院，北京 100083）

摘要：华北地区在我国经济社会发展全局中具有特定的区位优势，而水资源是影响该地区可持续发展的最突出因素。本文围绕华北地区“适应水土种植”国土空间布局这一核心问题，基于华北地区现状年（2018年）农业种植结构与水土资源布局分析结果，考虑不同人口–气候–社会经济情景以及水资源的约束条件，提出了适应水土资源条件的华北地区农业种植布局优化方案。建议适当减轻华北地区商品粮、其他商品化农产品的生产与供应负担；在提升区域水资源承载力方面，河北省通过调水等形式缓解水资源短缺现状，山西省以农业机械化和现代化来提高农业用水效率，山东省与河南省可适度休耕并提高林草覆盖率。此外，优化农业种植空间布局并适水调整种植结构，在深层地下水超采严重的河北平原东南部和天津市、浅层地下水超采区，发展“适应降水”的半旱地种植制度和结构，根据地下水回补上升的速率决定“休养生息”的具体时段。

关键词：华北地区；水均衡；国土空间规划；以水定地；水土资源匹配；适水种植

中图分类号：S-01　　**文献标识码：**A

Exploring Water-and-Land-Adapted Spatial Layout of Crop Planting in North China

Huang Feng[1], Yang Xiaolin[2], Fang Yu[2], Wang Sufen[2], Kang Shaozhong[2]

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: North China has specific regional advantages in the overall economic and social development of China, and water resources are the most prominent factor that affects the sustainable development of this region. This study focuses on the land spatial layout of water-and-land-adapted planting in North China. Based on the analysis of agricultural planting structure and water and land resource layout in the current year (2018) of North China, and considering varied population, climate, and socio-economic scenarios and water resource constraints, the study proposes a scheme for optimizing the agricultural planting layout in North China that adapts to local water and land resource conditions. We suggest that the burden on production and supply of commercial grain and other commercial agricultural products in North China should be appropriately reduced. In terms of improving the regional water resource carrying capacity, Hebei Province should alleviate its water shortage through water transfer. Shanxi Province should improve the agricultural water use efficiency through agricultural mechanization and modernization. Shandong Province and Henan Province can moderately fallow the land and improve forest and grass coverage. It is also recommended to optimize the spatial layout of agricultural planting and adjust the planting structure to adapt to water. In shallow groundwater overexploitation areas as well as Tianjin City and the southeast of Hebei Plain where deep groundwater overexploitation is severe, semi-arid land planting systems and structures that

收稿日期：2022-07-05；**修回日期：**2022-09-13

通讯作者：康绍忠，中国农业大学水利与土木工程学院教授，中国工程院院士，研究方向为农业节水与水资源；E-mail: kangsz@cau.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“水平衡与国土空间协调发展战略研究（一期）”(2020-ZD-20)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

adapt to precipitation should be developed, and the specific recuperation period should be determined according to the rate of groundwater recharge.

Keywords: North China; water balance; land spatial planning; water-adapted land use; matching of water and land resources; water-adapted planting

一、前言

科学开展国土空间规划，优化国土开发利用和保护格局，需要因水制宜、量水而行。在实现国土空间规划、生态修复、生态体系建设的水资源供需平衡总目标下，梳理国土空间开发利用现状及存在问题，提出适应水土资源条件的国土空间利用策略具有重要意义。华北地区在诸多方面具有区位优势，在我国经济社会发展全局中具有重大影响；在水资源短缺的条件下，地区农业为保障国家食物安全、推动农村全面发展提供了关键支持，但也面临着多方面的生态环境负效应，特别是多年地下水超采形成的大幅度下降复合漏斗问题威胁着灌溉农业的可持续发展。因此，厘清水土资源现存问题，提出适应水土资源条件的区域农业种植布局方案，促进华北地区农业健康发展，兼具理论研究与实践应用价值。

本研究涉及的华北地区包括北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省，区域人口占全国的比重为24.6%，相应耕地面积的全国占比为21.2%；因光热充足、土地肥沃成为我国最重要的农牧业生产和商品粮基地，也是重要的工业制造中心、城市群聚集中心。华北地区属于半干旱半湿润季风气候，水资源总量仅占全国的3.72%，人均水资源量约为全国平均水平的16% [1]。水资源构成了制约华北地区经济社会发展、居民生活水平提高的重大障碍，也成为新一轮国土空间规划中需要考虑的关键性控制因素。

已有研究多围绕华北地区水资源及农业用水配置 [1~4]展开，而结合国土空间规划层面的新需求 [5]，探索适应水土资源条件的华北种植布局优化等课题亟待深化。针对于此，本研究瞄准国土空间规划、生态修复、生态体系建设的水平衡总目标，分析华北主要农作区的现状年（2018年）农业种植结构与水土资源布局，考虑人口、经济、社会、气候情景、水资源承载力等约束条件，形成华北地区农业种植布局优化方案并提出应对策略建议。需要说明的是，文中涉及数据繁多，除注明引用源的数据外，均为自行建模计算及评估结果。

二、华北地区农业种植与水土匹配的现状与问题

（一）在耕地面积稍减的情况下，依然担负全国粮食与食物生产重任

华北地区是我国重要的粮食主产区，改革开放以来主要农作物（粮食、蔬菜、油料、果树）种植面积的全国占比基本稳定。同期，华北地区粮食总产量的全国占比也基本稳定，平均水平维持在24.5%左右。小麦、玉米、谷子、油料、蔬菜的产量占比分别为45.7%~63.4%、29.5%~39.6%、41.2%~72.3%、22.7%~36.3%、29.8%~40.5%。棉花、豆类产量占比明显降低：前者从1978年的26.3%下降至2021年的7.13%，后者从1991年的22.9%下降至2020年的9.44% [6]。

尽管耕地面积有所下降，但华北地区仍然担负着全国粮食和食物生产的重任，表现为农作物总播种面积的提高、大宗农作物产量的增加。例如，谷物产量从1992年的9.187×10^7 t提高到2020年的1.711×10^8 t，小麦、玉米产量分别从1978年的2.555×10^7 t、1.961×10^7 t增长至2020年的8.065×10^7 t、8.103×10^7 t；1978—2021年油料产量由1.43×10^6 t上升至1.078×10^7 t，1983—2020年棉花产量由2.72×10^6 t下降至5.2×10^5 t，豆类产量历经波动，产量范围为1.28×10^6~4.53×10^6 t [6]。

华北地区的种植结构变化情况如下。1978—2021年，粮食作物占总播种面积的比例基本稳定，最大值为1978年的83.4%，最低值为2003年的65%，多年平均值为75.1%，2020年为76.7%。小麦播种面积占粮食播种面积的比例，最大值为2006年的46.4%，最小值为1981年的39.1%，多年平均值为43.9%，2020年为43.1%。玉米播种面积占粮食播种面积的比例，最大值为2016年的46.7%，最小值为1984年的22.9%，多年平均值为33.3%，2020年

为45.1%。大豆播种面积占粮食播种面积的比例从1978年的4.97%下降到2020年的2.06%。油料作物播种面积占作物播种面积的比例从1978年的4.13%提高到2020年的7.18%。蔬菜播种面积占作物播种面积的比例从1978年的2.54%提高到2020年的11.46%。从种植结构看，在华北地区的高耗水作物中，小麦占比维持在40%以上，蔬菜占比稳步增长[6]。

（二）灌溉用水效率与水分生产力不断提高，但水资源紧缺状况未得到根本性缓解

在华北地区降水持续减少的背景下，根据华北六省市1981—2018年降水量统计及水文年型划分结果，2001—2018年，枯水5年、平水6年、丰水7年；其中2008—2013年为连续平水年，2003—2005年、2016—2018年为连续丰水区间，平水年和丰水年的占比达到72%。近20年来，华北地区的平均年降水量为601 mm；其中，枯水年平均降水量为522 mm、平水年为601 mm、丰水年为657 mm。由此可见，2000年以来华北地区降水减少的趋势有所缓解。

华北地区冬小麦–夏玉米体系的生育期降水量年型划分结果显示，2001—2018年冬小麦生育期枯水4年、平水7年、丰水7年；其中2012—2014年为连续平水年，2015—2018年为连续丰水年；2010年以来降水条件变好，仅有2011年为枯水年。夏玉米生育期枯水5年、平水6年、丰水7年；除了2014—2015年为枯水年，其余年份为平水年或丰水年。春玉米生育期枯水5年、平水7年、丰水6年，2010年以来只有3个枯水年。无论是全年降水量年型分布，还是主要作物生育期降水量年型分布，21世纪以来的20年中平水年和丰水年居多。但从长期气候变化趋势看，无论在平水年还是丰水年，与上一个气候时段（1970—2000年）相比，华北地区600 mm等降水量线已经转移到冀鲁豫交界的黄河一线。这一重要变动表征了气候的明显变化，对认识华北地区近20年种植业用耗水历史、开展未来种植业结构“适水调整”都具重要的指导意义。

从冬小麦生育期看，不同水文年型中各省份的冬小麦都处于降水亏缺状态；即使在丰水年，除河南省的亏缺量低于100 mm外，其他区域的水分亏缺均值为100~150 mm；河北平原、山东西部、河南北部是小麦水分亏缺相对严重的地区，亏缺均值为150~270 mm。夏玉米生育期在枯水年份，河北平原、山东西北部、河南北部依然面临降水亏缺状态。因此，从农田水均衡角度看，河南北部、山东西北部、河北平原在不同水文年型下的降水均不能满足各自的耗水需求，这一地带识别为“农田水分失衡带”，与华北地区“地下水超采漏斗区”高度吻合。因此，华北地区仍然需要相当的灌溉量才能达到目前的产量水平。地区总用水量从2000年的7.802×10^{10} m^{3}增长到2020年的7.836×10^{10} m^3，增长相对缓慢；而农业用水量从2000年的5.354×10^{10} m^{3}下降到2020年的4.197×10^{10} m^3，降幅（21.6%）较为显著。农业用水量在总用水量中的比例从2000年的68.6%下降到2020年的53.6%，明显低于全国平均值（62.1%），但地区分布差异很大。例如，北京市的农业用水仅占总用水量的7.9%，而天津市、河北省、河南省、山东省、山西省的对应占比分别为37.1%、58.9%、52.1%、60.2%、72.8%[7]。

华北地区在农产品增产、生产方式更加集约的情况下实现了农业用水量及占总用水量比例的明显下降，说明农业用水效率显著提高。区域内灌溉水有效利用系数从2000年的0.573提升至2020年的0.647，高于全国水平14.5%，其中天津市进步显著。2020年，天津市灌溉水有效利用系数为0.72，较2000年提高了22.6%；北京市为0.75（提高18.9%），河南省为0.617（提高16.5%），山东省为0.646（提高15.3%），河北省为0.675（提高9.50%）；华北地区粮食作物水分生产力从1.058 kg/m^{3}提升到1.543 kg/m^3，高于全国水平22.8%[8]。同期，华北地区各省份的亩均（1亩≈666.67 m^2）灌溉量均有明显下降，普遍比全国水平低50%以上；河北省亩均灌溉量从2000年的252 m^{3}下降到2020年的157 m^3（降低37.7%），河南省从197 m^{3}下降到164 m^3（降低16.7%），山东省从261 m^{3}下降到160 m^3（降低38.7%），北京市从290 m^{3}下降到119 m^3（降低34.1%），天津市从275 m^{3}下降到230 m^3（降低16.4%），山西省从270 m^{3}下降到171 m^3（降低36.7%）[7]。

华北地区2000—2020年的多年平均降水量为4.213×10^{11} m^3（折合水深606 mm），其中形成地表水资源量为5.935×10^{10} m^3，形成地下水资源量5.841×10^{11} m^3，相应的水资源总量为9.467×10^{11} m^3；多年平均用水总量为7.666×10^{10} m^3，其中工业用水

量为1.262×10^{10} m^3（占比为16.5%），城镇生活用水量为1.242×10^{10} m^3（占比为16.2%），农业用水量为4.846×10^{10} m^3（占比为63.2%）[7]。同期，华北地区农田平均年耗水量为706 mm。从水平衡角度（耗水量减去降水量）看，近20年的年均农田水分亏缺100 mm，折合农田亏缺水量为2.43×10^{10} m^3。（说明：根据作物亏缺需水得到满足后实际蒸散的水分，除以20年来平均灌溉水有效利用系数0.614即得20年的平均灌溉水量为3.96×10^{10} m^3，与华北地区20年的平均农田实灌量（4.36×10^{10} m^3）的误差小于10%；文中计算结果经由水平衡方程验证，与水资源公报的统计结果基本一致）。

根据华北地区近20年来的农田灌溉耗水、降水耗水特征[1]，结合近20年来地区粮食平均水分生产力（吨粮耗水763 m^3）、平均粮食总产（1.438×10^8 t）[8]可测算，华北地区年均农田耗水为1.097×10^{11} m^3，其中源于灌溉水3.78×10^{10} m^3、源于降水7.19×10^{10} m^3。近20年来，华北地区地下供水在总供水中的平均占比为56%；因灌溉需求时空分布与地表水源不匹配，农田灌溉中源于地下水的比例高于56%。测算结果表明，华北地区近20年来的年平均抽取地下水灌溉量为3.489×10^{10} m^3，在多年平均地下水资源量中的占比达到59.7%；客观而言，这一比例是明显偏高的。

（三）农业水土资源匹配失衡，农业产出与水资源承载力矛盾突出

华北地区农业水土资源高度不匹配。对于单位耕地面积占有的水资源量，2000年为208 m^3/亩（为全国水平的16.7%），2018年为253 m^3/亩（为全国水平的18.6%）；表观上看略有增加，但因两个年份均为丰水年且耕地面积略有减少，使得相关变动不具有统计显著性。从国土空间分布看，河北省（为全国平均水平的12.4%）、山西省（14.8%）最为失衡，天津市（19.8%）、河南省（20.6%）、山东省（22.2%）均在全国水平的20%附近；仅有北京市接近全国水平（81.6%），但这与其近年来产业政策调整引起的耕地数量减少有关。从水土匹配的时间变化看，天津市农业水土资源的不匹配状态加重，而其他各省份的农业水土匹配趋向均衡化；天津市和河北省严重缺水、山西省中度缺水的基本态势未发生改变。在当前经济社会快速发展的背景下，水土资源高度不匹配的态势很难在短期内得以扭转，这是华北地区食物安全必须面对的重大挑战。

华北地区是我国粮食和食物安全的重要保障区，但其农业成就是在水资源严重短缺条件下取得的，人均水资源量、水土资源配置比例均显著低于全国平均水平；因气候干旱导致水资源量减少、工业城市发展对水资源需求量增加等因素的共同作用，区域内的农业用水总量逐年减少。然而，随着农业生产条件改善，作物产量稳步提高，如作为小麦和玉米主产省份的河北、河南、山东等地，近30年来的粮食总产量增加了5.85×10^7 t，其中粮食单产的大幅增加是主导因素。在粮食单产方面，小麦增加了200.9 kg/亩（增幅为120%），玉米增加了179 kg/亩（增幅为90%），而作物耗水量并没有随着粮食单产增加而明显增长。可以认为，农业总用水量降低条件下农业产出的不断增加，主要得益于农业科技进步、农业基础设施条件改善。也要注意到，在未来华北地区气候变干变暖的趋势下，农业能否持续承载这样的生产规模是难以回避的重大问题。

除了满足区域内的食物热量需求，华北地区农业还肩负着全国粮食和食物安全的重任。华北地区在1998—2018年食物热量供给充足，自给率不断上升；但食物消费的刚性增长与资源环境硬约束并存，在供给能力提升的同时，耕地资源和水资源必然面临考验，尤其是北京市、天津市、山西省的热量供需亏缺严重。在不加重水土资源负荷的前提下稳定保持河南省、山东省、河北省等粮食主产区的生产能力，“适水”发展是根本出路。

根据华北地区水土资源承载力评价研究结果，北京市的农业水土资源匹配系数、污水处理率、农业用水比例及垦殖率均处于I等级，这是北京市农业水土资源可承载力较高的主要原因。然而，北京市人口密度高、城市化水平高、第一产业贡献率低等因素限制了农业的发展规模；农业发展潜力有待提升，通过提升农业机械动力应用水平方式来提高粮食产量，会使农业水土资源承载力更佳。天津市作为北方大城市，和北京市一样具有人口密度大、城市化水平高、第一产业贡献率低的特征，农业不是主要发展行业；地区水质较差（水功能区达标率、污水处理率均处于IV等级）也是水土资源承载力较低的主要原因。

河北省面积较大，人口密度相比京津两市也较

低，相应地农业占比稍高一些，第一产业产贡献率为9.27%；农业机械化较为发达，单位面积耕地的用电量、农业机械总动力均处于I等级。造成河北省水土资源承载力不高的主要因素为水质偏低（主要为劣质水），如黑龙港地区浅层咸水量大（2~5 g/L微咸水年可利用量约为2.2×10^9 m^3）而污水量较小。河北省的水功能区达标率、污水处理率、万元国内生产总值（GDP）产污量及化学需氧量等均处于IV~V等级，亟待改善。应高度重视本地区的水质问题，以提高污水处理率、减少污水排放等措施来优化水土资源承载力。

山西省农业水土资源承载力在华北地区居后（仅为0.362），处于超载状态。究其原因，农业水土资源匹配系数较低、农业万元GDP耗水量较高、农业用水比例较高、农田有效灌溉比率较低、单位面积耕地用电量及农业机械总动力较低是主要因素。这些指标等级也反映出了山西省农业发展较为滞后，农业水资源利用效率低造成了农业水资源浪费。需要推进农业机械化和农业现代化，促进节水事业发展，才能实质性改善山西省的水土资源承载力。河南省和山东省处于水土资源承载的临界状态，主要是因为当地垦殖率和农业用水比例较高，如河南省垦殖率为48.58%、山东省垦殖率为48.07%。此外，林草覆盖率较低也是影响山东省水土资源承载力的原因之一。

三、水土资源约束下的华北地区农业种植国土空间优化配置

（一）华北地区农业发展规模动态预测

农业水资源承载力主要体现在两方面：农业可利用水资源对耕地有效灌溉面积的承载能力；农业可利用水资源灌溉生产的粮食对流域人口的承载能力。河北省、山东省、河南省、山西省是全国粮食增长的核心区域之一，影响区域粮食生产的主要制约因素在于地表水开发潜力小、地下水超采严重、供水明显不足。采用多类方案，建立了“承载灌溉面积”“承载粮食生产”“承载人口规模”计算模型；考虑节水、气候、技术等动态变化因素，讨论了多年平均来水条件下华北地区农业水资源承载能力。

首先，分析了区域内农业可利用的灌溉水资源量。华北地区生产发达、人口稠密，不同行业用水竞争激烈，经济社会需水模数较大，而水资源衰减问题相对严重，水资源短缺、水生态退化、水环境污染现象较为突出。为了实现华北地区的可持续发展，需要建立水资源配置工程体系，综合利用地表水、地下水、引黄水、南水北调水、非常规水。为此，选取2025年、2030年、2035年为预测年份，依据南水北调工程总体规划及中/东线工程规划、华北六省市水资源公报及规划报告等数据源，预测了黄河水供水、长江水供水、地表水及地下水供水情况；综合考虑各省份相关行业部门规划、技术经济可行性等制约因素，测算了华北地区非常规水源供水量；灌溉用水比例以2014—2018年各省份的灌溉用水比例变化趋势为基准，在此基础下降5%~10%，由此推算出2025年、2030年、2035年各省份的灌溉用水比例，从而计算得出农业灌溉可用水量。

其次，区域可承载的有效灌溉面积按灌溉供水量与亩均灌溉用水量之比来计算。推广节水设施可减少农业可利用灌溉水量，从而支持可承载有效灌溉面积的增加；根据节水面积的近10年变化情况来预测未来节水因子。气候变暖、降水量减少等气候因子将增大亩均灌溉水量，对有效灌溉面积造成不利影响。根据测算，华北六省市2025年、2030年、2035年灌溉用水量可承载的有效灌溉面积均比现状年高。例如2025年，北京市可多承载7.42%~17.3%，天津市可多承载42.78%~97.54%，河北省可多承载29.11%~46.77%，河南省可多承载17.22%~28.82%，山东省可多承载17.92%~29.64%，山西省可多承载0.7%~16.23%；具体来看，北京市增幅较小是因为节水设施已经得到了普遍推广（节水灌溉比率已接近1），河南省和山东省增幅较小是因为亩均灌溉水量已达较好水平（难以进一步降低）。2030年、2035年华北六省市随着外来水量的不断增加以及农田水利设施的持续完善，由灌溉水量承载的有效灌溉面积均将进一步增加。

第三，区域可承载的粮食产量按亩均粮食产量与种植面积之积计算，种植面积根据华北六省市的灌溉面积与种植面积关系计算得到。农业机械耕作、节水灌溉、施肥等科技因子会提高粮食产量，根据近年的科技进展以及文献研究结果，预测未来年份的科技因子区间。相比现状年的粮食产量，2025年北京市可多承载35.12%~49%，天津市可多

承载 59.21%~122.31%，河北省可多承载 36.91%~57.1%，河南省可多承载 20.93%~34.13%，山东省可多承载 20.51%~33.76%，山西省可多承载 6.87%~24.41%。

最后，区域可承载的人口规模按粮食总产量与人均粮食需求量之比计算。2025 年、2030 年、2035 年，华北地区（除去北京市和天津市）人口在不同程度地高于现状地区的实际人口规模，说明不同省份之间存在粮食的调入 / 调出情况。这一结果对应于已有文献的研究结论：河北、河南、山东、山西四省为粮食输出区、北京、天津两市为粮食输入区。

预测结果表明，2025 年、2030 年、2035 年华北地区灌溉水量分别为 5.675×10^{10} m^3、5.842×10^{10} m^3、5.818×10^{10} m^3，可支撑的灌溉面积分别为 3.466 亿亩、3.618 亿亩、3.646 亿亩，可承载的粮食产量分别为 2.273×10^{11} kg、2.419×10^{11} kg、2.487×10^{11} kg，可承载的人口数量分别为 5.88 亿人、6.26 亿人、6.44 亿人。

（二）华北地区“农田水分失衡带”的“适水种植”优化方案

河南北部、山东西北部、河北平原构成了华北地区“农田水分失衡带”。以地下水超采相对严重的河北平原为例，探讨了“适水种植”优化方案。

河北省的地下水超采区主要分布在河北平原，其中浅层地下水超采区分布在河北平原西部的太行山山前平原区（包括保定市、石家庄市、邢台市、邯郸市西部，张家口坝上的部分县域），深层地下水超采区分布在黑龙港地区（以沧州市、衡水市、邢台 – 邯郸东部县域为主，还有唐山南部县域）。该地区冬小麦 – 夏玉米一年两熟的种植制度主要靠抽取地下水进行灌溉，尤其是冬小麦生育期的自然降水严重不足，需抽取大量地下水进行灌溉以满足冬小麦生长需求。为了缓解地下水水位下降速率、维持地下水资源可持续开采，应适时调整地下水超采区的冬小麦种植格局，也要考虑调整高耗水蔬菜的种植规模。为此，提出了两类种植结构调整模式以支持“节水压采”：保持原有冬小麦 – 夏玉米体系不变，减少每年的冬小麦种植面积，实现季节性休耕；冬小麦采取“适应降水种植”方式，根据水文年型的不同组合来预先确定冬小麦的种植规模。

在冬小麦生育期抽取地下水进行灌溉是导致地下水位下降的主要原因，因而减少冬小麦种植面积成为减少灌溉耗水的直接途径。以河北省地下水超采区灌溉节水 50 m^3/ 亩为基础目标，探讨了不同水文年型时冬小麦需减少的种植比例（本研究基于降水与耗水的差值来计算灌溉耗水，丰水年降水多故单位灌溉耗水少；在同样的灌溉节水目标下，丰水年需要减少更多的冬小麦种植面积，而枯水年则相反）。由于降水是冬小麦生育期需水的唯一天然来源，为了充分利用降水资源、减少地下水抽取，“适应降水种植”（主要指根据水文年型调整种植规模，后续还要考虑采用旱地小麦种植模式）的冬小麦种植模式应成为当前考虑的重点。为达到“枯水年少种，丰水年多种”的目标，在以灌溉节水为度量时，应充分考虑降水的年际变化、水文年型的分布，即“丰水年节水目标低，枯水年节水目标高，实现总体节水平衡”。此外，对于冬小麦生育期耗水，枯水年最高、丰水年最低，因而适应降水的种植模式，应尽量降低冬小麦生育期的耗水量。

基于以上分析，从降水的年际分布出发，进一步讨论水文年型与种植模式的所有组合中冬小麦灌溉耗水与节水的规律、冬小麦种植面积与灌溉定额以及灌溉节水目标之间的关系，据此制定“适应降水种植”的冬小麦种植模式。

（三）华北地区“适水种植制度”研究

综合分析了过去 30 年来华北平原 31 种多样化种植制度的“适水种植”效应，通过长期定位试验明确了传统冬小麦 – 夏玉米一年两熟种植制度的优化节水灌溉模式与节水潜力，探究了 30 种种植制度（含单作和轮作在雨养、灌溉等条件）的地下水消耗、产量、经济效益、水分利用效率等适应性指标。从华北地区的水土适配角度看，需统筹考虑光 / 热 / 水资源禀赋，因地制宜发展多样化的种植制度，确保华北地区水资源可持续利用与粮食生产双重安全、农业绿色发展的协调。

四、华北地区农业种植布局的优化举措

（一）调整地区功能定位

针对华北地区的水资源现状、未来气候变化以及社会发展情景，需从国家全局层面开展华北地区

粮食和食物安全地位的重新评估与定位调整；位于华北地下水超采区的京津冀、豫北、鲁西北等尤为迫切。在满足华北地区经济发展、城市化建设、居民生活需求，保障华北以及全国的粮食和食物安全的基础上，在今后一段时期内，可适度减轻华北地区商品粮和其他商品化农产品的生产与供应负担。给予华北地区耕地、水资源、生态系统“休养生息”时间，支持未来华北以及全国粮食和食物安全的可持续性，最终实现适应多重目标、反映国际化和绿色化背景的华北地区水资源保障能力。

（二）加强水土适配

西部地区水资源开发利用程度高、东部地区土地资源开发利用程度高，“西北缺水、东南缺土”的水土资源整体格局反映了全国水土资源分布极不均衡的现状。水资源短缺是造成华北地区水土匹配现状的关键因素，改善农业水土资源的匹配性是提高华北地区农业生产综合效益的有效途径。对于农业用水量比例远高于其耕地面积比例的北京市和天津市、略高于耕地面积比例的山东省和河北省，应采取积极措施以调整作物种植结构，改种低耗水作物或扩大节水灌溉技术应用，严格落实水资源管理制度，守住水资源红线和耕地面积红线。

（三）提升资源承载力

华北地区的水土资源承载力存在明显的时空差异性，各省份的农业可持续发展水平受到约束。在考虑节水、气候变化、农业科技等方面动态演进的条件下，基于华北地区未来农业发展规模的动态预测结果，明确各省份提升水土资源承载力的途径为：天津市以提高水质为主要改善举措，河北省在改善水质的同时可通过调水等方式缓解水资源短缺局面，山西省宜大力推广农业机械化、农业节水普及化并据此提高农业用水效率、实现农业现代化，山东省和河南省需进行适度休耕（以减少耕地面积）并提升林草覆盖率。

（四）优化农业种植空间布局

在综合考虑水文年型、地下水采补平衡、灌溉节水目标、粮食和食物及营养热量安全等多重目标的基础上，华北地区抓紧调整种植业生产的国土空间布局，实质性落实“以水定地”。在华北地下水深层超采区，采取科学方法和坚决措施，优化以冬小麦（降水与需水不匹配型）、蔬菜（高耗水型）为代表的灌溉水需求“大户”的种植空间布局，“该减则减”；而因压减造成的产能下降，可考虑在地区内甚至全国范围进行补偿及平衡。具体而言，深层地下水超采严重的河北平原东南部（沧州市、衡水市、邢台–邯郸东部县域）和天津市，浅层地下水超采区（太行山山前平原、豫北、鲁西北），需要因地制宜，严格按照当地的水资源、人口和社会经济承载量，科学规划并合理配置农业及种植业水资源；发展“适应降水”的半旱地种植制度和结构，根据地下水回补上升的速率决定“休养生息”时段的长短。

（五）适水调整种植结构

在华北地区，对于严重地下水超采区，应适度降低高耗水作物的种植规模，合理增加休耕比例，尝试单作、冬小麦–夏玉米复种的季节性休耕、雨养种植模式。对于中度地下水超采区，可发展经济作物的粮食基多样化轮作模式（1.25≤复种指数≤1.67），以此增加休耕比例、降低耗水并提高经济效益。对于粮食功能区，建议保留冬小麦–夏玉米种植模式，推广配套的综合节水技术应用，如“麦2玉1”的优化灌溉制度、贮墒旱作提高土壤水分利用效率等农艺节水措施，滴灌/微喷灌等水肥一体化的工程节水技术，节水抗旱品种的生物节水技术等；还需配套一定的节水管理政策。

五、结语

华北地区是全国粮食和食物安全的关键区域，尽管近20年来降水条件相比过去30年（1980—2010年）的平均情况已有好转，但与前一个气候时间段（1970—2000年）相比，降水和水资源仍整体减少，地下水超采严重，因而压减地下水开采仍是今后的艰巨任务。本研究提出了适应水土资源条件的华北地区农业布局可持续发展构思：抓住一条主线（适水发展）、依靠两个落实（以水定产、以水定地），突出四大重点（增强水土适配、提升资源承载力、优化农业生产布局、适水调整种植结构）。在充分考虑气候变化、经济社会发展的基础上，运用“水文年型–种植结构–节水灌溉”目标组合，力求

发挥“节水保产、节水稳产”效应，尽可能压低菜果生产中的地下水开采需求，追求“节水”“粮丰”双赢。相关研究结果丰富了已有研究结论 [9~13]，为解决华北地区粮食安全用水问题提供了路径依据。

确保华北地区未来粮食和食物安全的生产用水，还需考虑划定“农业用水安全红线”，具体包括农业用水总量红线、灌溉水有效利用系数红线、耗水总量红线、单位耗水红线四方面。未来，华北地区农业水土资源匹配、粮食和食物安全都需在上述水资源与农业用水历程的基础上加强水土资源适配性。

参考文献

[1] 黄峰, 杜太生, 王素芬, 等. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 28–37.
Huang F, Du T S, Wang S F, et al. Current situation and future security of agricultural water resources in North China [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(5): 28–37.

[2] 赖冬蓉, 陈益平, 秦欢欢, 等. 变化环境对华北平原地下水可持续利用的影响研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 48–55.
Lai D R, Chen Y P, Qin H H, et al. Impacts of changing environment on sustainable utilization of groundwater in the North China Plain [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5): 48–55.

[3] 秦欢欢, 孙占学, 高柏. 农业节水和南水北调对华北平原可持续水管理的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1716–1724.
Qin H H, Sun Z X, Gao B. Effects of agricultural water conservation and South-to-North Water Diversion on sustainable water management in North China Plain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1716–1724.

[4] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875–879.
Liu C M. Agricultural water issues in China: Discussions on research highlights [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875–879

[5] 祝培甜, 张丽君. 国土空间多功能利用评价与分区利用策略 [J]. 国土资源情报, 2021 (3): 28–35.
Zhu P T, Zhang L J. Multi-functional utilization evaluation of land space and zoning utilization strategy [J]. Land Resources Information, 2021 (3): 28–35.

[6] 国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. (2020-05-15)[2022-07-15]. https://data.stats.gov.cn/.
National Bureau of Statistics. National data [EB/OL]. (2020-05-15) [2022-07-15]. https://data.stats.gov.cn/.

[7] 中华人民共和国水利部. 水资源公报 [EB/OL]. (2020-05-15) [2022-07-15]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/.
Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. Water resources bulletin [EB/OL]. (2020-05-15) [2022-07-15]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/.

[8] 全国农业技术推广服务中心. 1998—2020 年中国农业用水报告 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
China National Agricultural Technology Extension Service Center. China agricultural water use report in 1998—2020 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.

[9] 王浩, 汪林, 杨贵羽, 等. 我国农业水资源形势与高效利用战略举措 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 9–15.
Wang H, Wang L, Yang G Y, et al. Agricultural water resource in China and strategic measures for its efficient utilization [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 9–15.

[10] 周祖昊, 杨波, 刘海振, 等. 华北地区农业用水影响因素与保障对策研究 [J]. 中国农村水利水电, 2017 (8): 24–27.
Zhou Z H, Yang B, Liu H Z, et al. Study on the influencing factors and security countermeasure of agricultural water in North China [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2017 (8): 24–27.

[11] 闫鹏, 陈源泉, 隋鹏. 基于文献计量的华北地区农业用水问题研究态势分析 [J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(9): 206–214.
Yan P, Chen Y Q, Sui P. Status and trends of researches on agricultural water issues in North China: Based on bibliometric methods [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(9): 206–214.

[12] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1–10.
Zhang G H, Fei Y H, Liu C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 1–10.

[13] 张光辉, 连英立, 刘春华, 等. 华北平原水资源紧缺情势与因源 [J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 172–176.
Zhang G H, Lian Y L, Liu C H, et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(2): 172–176.