Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Watershed Ecology—Article

环境数据的获取、精细化和整合——在意大利西北部脆弱山地社区诺瓦莱萨的初步应用

Massimiliano Lega [a], Marco Casazza [a,c,*], Laura Turconi [b], Fabio Luino [b], Domenico Tropeano [b], Gabriele Savio [b], Sergio Ulgiati [c], Theodore Endreny [d]

[a] Department of Engineering, Parthenope University of Napoli, Naples 80143, Italy
[b] Institute for Hydro-Geological Protection Research, National Research Council (CNR-IRPI), Turin 10135, Italy
[c] Department of Science and Technology, Parthenope University of Napoli, Naples 80143, Italy
[d] Department of Environmental Resources Engineering, College of Environmental Science and Forestry, State University of New York, Syracuse, NY 13210

ARTICLE INFO

Article history:
Received 31 October 2017
Revised 30 April 2018
Accepted 30 August 2018
Available online 7 September 2018

关键词
环境数据精细化
气候变化
山地社区
意大利
恢复力
社会生态系统
水文地质风险

摘要

气候条件影响了山地社区的社会经济发展，特别是易发生高山斜坡破坏和泥石流等自然灾害的山区，气候因素将发挥重要的影响作用，因此在制定适当的可持续发展方案时应考虑到气候因素。同时，气候变化改变了生态系统服务（ES）功能，使得土壤肥力下降、水资源供应减少、草地面积减少、监管服务（如防止自然灾害）和文化服务发生潜在转变。本研究以意大利阿尔卑斯山区为研究区域进行初步讨论，该地区经历过极端降水和侵蚀，社区的发展十分依赖于对自然资源的直接利用。初步研究结果表明，经济因素影响了诺瓦莱萨社区（位于意大利西北部的皮埃蒙特地区）过去的人口变化趋势。然而，由气象气候因素引发的岩崩和泥石流事件的数量不断增加，可能会进一步影响社区人们的生计。因此，环境监测和数据分析对于辨识景观和气候变化的趋势并选择适当的规划方案是很重要的，这有助于将山地社区人口维持在全球人口的 10% 左右，这也是贫困地区未来经济发展的一个重要机遇。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

人类活动引发了地球的一系列变化[1,2]，包括土地利用变化和气候变化，它们之间相互作用，导致自然资源严重退化，进一步影响了依赖这些资源的社区的发展[3, 4]。例如，极端降水的增加和植被覆盖的减少会导致灾难性的侵蚀、山体滑坡和洪水，破坏了用于农业生产的土地[5]。由于山坡陡峭、土壤稀薄、植被稀疏，高山地区尤其容易受到环境退化的影响。高山地区的村庄之间相互独立，且几乎没有其他可作为经济来源的自然资源[6,7]。

环境退化的后果主要表现在某些生态系统服务（ES）的丧失。ES包括供应（食物）、调节（气候）、支持（营养循环）、文化（娱乐）等[8]。气候变化与ES丧失之间的关系在以往文献中已做研究[9,10]，ES丧失主要表现在山区土壤肥力下降、水供应减少[11]、有利于形成森林的草地减少[12]、监管服务（如防止自然灾害）和文化服务[13]发生潜在转变。而社区发展需设法应对ES空

* Corresponding author.
E-mail address: marco.casazza@uniparthenope.it (M. Casazza)

2095-8099/© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文: Engineering 2018, 4(5): 653–642
引用本文: Massimiliano Lega, Marco Casazza, Laura Turconi, Fabio Luino, Domenico Tropeano, Gabriele Savio, Sergio Ulgiati, Theodore Endreny. Environmental Data Acquisition, Elaboration and Integration: Preliminary Application to a Vulnerable Mountain Landscape and Village (Novalesa, NW Italy). *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.08.011

间和时间的非均匀性，以及不同服务之间的权衡和协同作用[14]。同时，高山社区的生态系统服务发生的改变，使得社区的恢复力也在发生改变。基于传统生态知识（TEK）的社会具备了适应气候和景观变化的能力[15]，但高山社区资源和信息的缺乏阻碍了这种适应能力的发展[16]。为了解决这些问题，应制定规划方案来应对环境变化及其对人类活动和人类福祉的影响。当制定相应的规划方案时，应在地区尺度上对环境和社会经济数据进行适当的收集和处理，并且收集这些数据时还应考虑到时间上的规律和区域上的差异。

本文以意大利阿尔卑斯山区为研究区域进行初步讨论，该地区经历过极端降水和侵蚀，社区发展十分依赖于对自然资源的直接利用。过去的研究集中在山区的水文地质情况，却忽视了水文地质变化对村庄稳定性造成的多重影响。可用的社会经济数据的缺乏也间接地影响了本研究的开展。在20世纪，一些高山地区的人口严重减少，导致诺瓦莱萨村以及其他山村的服务供应量减少，当地居民生活水平下降[17]，使得社会和经济未能稳定下来。阿尔卑斯山地区具有重要的研究意义，对该区域的研究与对欧洲的研究有密切的相关性。虽然阿尔卑斯山是欧洲中部人口较少的地区之一，但它是世界上人口最稠密的山区之一[18]。

本文得到的初步的数据分析为解答一些科学问题提供了帮助。第一个问题是，地质和水文气象数据能否说明灾难性侵蚀频率的变化规律；第二个问题是，如果灾难性侵蚀频率增加，利用社会和经济数据能否有助于采取适当行动以降低山地社区的脆弱性。本研究的最终目标是在不断变化的气候条件下，理解未来的几年里社区发展和自然灾害之间的动态相互作用。此外，这项长期研究将试图解释这种相互作用对偏远村庄的恢复力和生计的影响，特别是那些具有文化遗产和历史遗产的村庄。

2. 方法

2.1. 研究区域

本文的研究区域位于意大利西北部的皮埃蒙特地区的切尼斯亚山谷。这个地区的最高山是Rocciamelone山及其附近的山峰，这些山峰位于海平面以上3538 m。该地区的主要村庄诺瓦莱萨村位于海平面以上900 m，它与山顶相距4 km，平均斜坡率为60%。诺瓦莱萨位于托里诺城市中心的行政区域内。该区域的河流包括Malo、Cenischia、Gioglio、Claretto、Marderello和Crosiglione（在切尼斯亚河的左侧）。在Gioglio和Claretto之间发现了一条名为Le Roncie的小溪流，后者并没有被归类为河流，因此被排除在研究之外。从海平面以上2400 m开始，山上就没有了多年生植被或树木覆盖；而低海拔山区有牧场以及稀疏的灌木和树木覆盖，主要是瑞士山松（*Pinus mugo*）和欧洲落叶松（*Larix decidua*）。在重新造林的过程中也引进了其他物种，但是稀薄的土壤限制了植被的生长。Marderello河流域的面积为6.61 km^2，历史记录产生的泥石流量约为2.6×10^6 m^3[19]。根据研究报告，在Rocciamelone山斜坡上有15 km^2的深层重力斜坡变形（GSD）。

该区域地貌的改变主要与现有的陡峭斜坡、构造活动、不成熟的水文网络和正在发生的退化过程（如岩崩、复杂的滑坡和泥石流等）有关，这些过程也与水文动力学有关。由于山坡具有不同的暴露程度和暴露方向，导致大气温度具有不同的梯度，这种现象造成了风的产生；同时由于地形降雨和夏季雷暴，泥石流很容易被引发。位于Rocciamelone山北部的冰川运动（目前为一个小冰川）形成了现有的斜坡，并留下了相关的沉积体。而重大水文地质事件（如泥石流）产生了岩屑。

泥石流是意大利阿尔卑斯山脉和世界其他山区的常见问题。在过去的几十年里，发生了数起泥石流事件，并造成了严重的破坏和死亡[20,21]。理解泥石流的形成过程（引发条件和下游转移速率）对于评估它们的风险至关重要。研究泥石流过程的一个重要方法是对历史数据[22]和泥石流观测站的实时数据的积累[20,23,24]。为了研究泥石流的引发条件及在自然环境中的演变和沉积过程，地质水文灾害防治研究所（CNR-IRPI，隶属于意大利国家研究理事会）的研究人员开发了一种基于频率事件的历史数据库[25]。同时，从1994年开始，通过利用和更新现有的仪器网络，在该地区开展了密集的监测活动，以便在高山环境中测量不同的气象和水文变量。显然，由于极端环境条件的影响，持续的技术更新和仪器校准过程可以避免无效数据，这在冬季尤其重要——冬季积雪覆盖率高，因此该地区的可达性有限。尽管如此，监测参数的数量在多年里一直在增长。

在公元7世纪，诺瓦莱萨建立了修道院，以支持中世纪的朝圣路线，即从意大利罗马到西班牙的圣地亚哥-德孔波斯特拉（途径法国）。这座修道院的战略定位是，在与法国相邻的边界上向朝圣者和军队提供支持。当萨拉森人在公元906年发起突袭，修道院被废弃

了[26]。大约在12世纪末，由于山北集市和市场的发展，商业活动激活了该地区的发展。因此，附近村庄的人们开始了高山向导的工作：除了在冬季搬运货物和从铁轨除雪外，他们开始为旅行者提供帮助。后来，在18世纪，拿破仑开辟了一条全新的道路，这条道路运货的历史增量逐渐提高（几年后运货马车的数量增加了3倍）[27]。尽管诺瓦莱萨村是与外界隔离的山区，但赛尼斯山口通道却使诺瓦莱萨与欧洲其他国家进行了文化和生态旅游的交流。这也可以由诺瓦莱萨的圣斯蒂芬教堂里的一幅画证明。这幅画由佛兰德画家彼得·保罗·鲁宾斯于17世纪创作。此外，据记载显示，有游客参观附近高耸的瀑布。诺瓦莱萨居民的经济活动主要与农业有关，其中包括在山区环境中工作，以及服务于意大利-法国的跨高山旅游，后者与山口的一个扩大的人工水库（Moncenisio湖：6.68 km^2，总库容约为3.2 $\times 10^8$ m^3）相连。因此，研究地点具备一些有利特征来评价环境因素在一个小山区社区生活中的作用，在其千年的历史中表现出高度的复原力。

2.2. 数据来源

Marderello、Claretto和Crosiglione河流区域的有效地表、斜坡、走向和地质岩性的基本数据事先已确定。这些数据在以前发表的论文中也有报道，基本数据如表1所示。最初安装和运行水文气象监测网是为了监测气象参数，并监测边坡失稳现象，该水文气象监测网目前由7个不同的装置组成[23,25]。

更详细地说，每个装置的雨量计（Deltaohm model HD2013）的采样面积为400 cm^2，采样容量为0.1 mm。该装置还配置有可以记录相对湿度、空气温度、大气压力、风速和风向的传感器。这7个装置的安装范围在海平面以上800~3100 m，装置中的辐射计的位置在海平面以上2850 m（阿尔卑斯山Ca d'Asti避难所），而水位传感器的位置在海平面以上820 m。该监测系统由一个超声波水位传感器、两个摄像机和4个垂直的地震检波器（10 Hz）组成，每个装置相距约50 m[28]。一个全天使用的摄像机和两个地震检波器被置于Marderello流域的海平面以上1850 m处。2017年，诺瓦莱萨村安装了一个X波段低功率连续波雨滴测量器（PLUDIX）。PLUDIX可以提供水滴大小分布（DSD）的数据，即在1 min的时间分辨率下，对21个不同的雨滴等效直径大小进行计算。雨量计于1994年安装，但天气和泥石流限制了它的使用，所以记录的数据并不完整：由于当时网络不能使用，使得1994—2002年和2003—2004年的数据丢失；2008—2011年期间由于网络问题而暂停了监测活动。在2012年6月对监测网络进行改进后，该网络重新启动。

大量资料都记录了岩崩数据[19]。从1994年开始，通过对Marderello、Claretto和Crosiglione这3条河流的监测得到了泥石流数据；洪水数据来自于档案[29]。社区数据在公元726年首次被记录为诺瓦莱萨修道院的一部分，然后从1861年开始正式作为意大利人口普查的一部分被收集。意大利国家统计研究所（ISTAT）负责收集、执行和验证意大利所有官方统计分析，并在网上公布普查数据，诺瓦莱萨市现有的人口普查数据也作为补充材料被公布。

3. 结果和讨论

3.1. 气象资料

表1给出Claretto、Marderello和Crosiglione河流中的雨量计记录的主要地质和气象数据（年平均降雨量由Marderello雨量计得到，它是该地区最早安装的雨量计，位于3条被监测的河流的中心）。

研究区年平均降雨量为850 mm，62%的记录显示降水主要集中在春秋季。2000年秋季最大降雨量为710.6 mm，而2008年春季的最大降雨量为678 mm。2000年10月降雨量达到493.8 mm，与一次大洪水事件相吻合[30]。最大降雨发生在2008年3月，降雨量为

表1 主要地质和气象资料

Characterization	Claretto	Marderello	Crosiglione
Effective surface (km^2)	4.10	6.61	5.78
Slope (%)	74	75	65
Exposition	Southwest	Southwest	Southwest
Geo-lithology	Calcshist	Calcshist	Calcshist and phyllites
Mean annual precipitation (mm)[a]	—	850	—

[a] From the Pian Marderello rain gauge.

553.8 mm；最小降水发生在2003年夏季，这是一个典型的干旱事件[31]。图1显示了1994—2015年的年尺度季节性累积降雨图。可获得数据的季节是：春季、夏季、秋季。图1说明春季降水增加，秋季降雨减少。后两个时期的夏季降雨记录值低于第一时期。然而，2011—2015年的夏季降雨略高于前10年。

图2给出了典型的日降雨量数据，用mm表示，即24年相同时间内的日降水数据的平均值。数据是从1994年到2017年的5月至10月，由Pian Marderello（海平面以上2100 m）地区的雨量计收集得到。这些数据最初用于研究降雨对引发泥石流的影响。泥石流发生在晚春到秋季，所以冬季数据没有予以考虑。这段时间的平均日降雨量为2.30 mm，最大值为12.03 mm，最小值为0.04 mm。以平均日降雨量大小来排序测量值得出6月22日和6月23日记录到的降雨量最小，而10月14日和10月15日记录到的降雨量最大。记录到的最大日降雨量出现在2000年10月15日，为204.8 mm。

由于当地监测网记录的数据不足30年，因此不能进一步推断气候变化趋势。而与1990年前后的数据相比，意大利阿尔卑斯山的皮埃蒙特地区的雨量计监测网记录了极端降水事件的增加[32]。记录显示，随着降雨强度的增加，降雨量略微增加[33]，超过了意大利阿尔卑斯山甚至整个欧洲-地中海地区[34]，这也可以由秋季季节性累积降雨图（图1）证实。根据测量记录（图2中10月），在意大利的几个地区，冬季的干旱次数和降水强度都有增加趋势[35]。总而言之，该地区的降水强度有所增加，干旱也变得更加频繁。

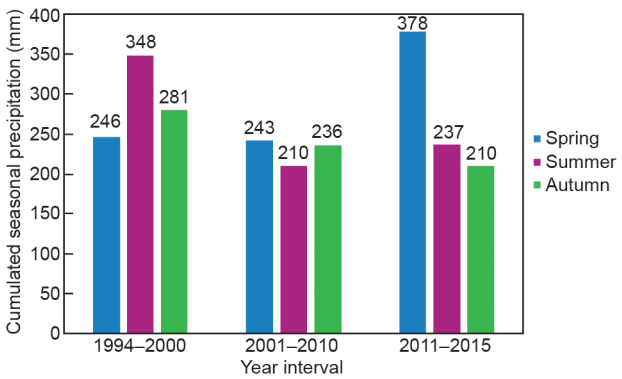

图1. Marderello河安装的第一个雨量计（Pian Marderello）测量的年尺度季节性累积降雨（mm）。时期（年）分为：1994—2000年、2001—2010年、2011—2015年。数据如柱状图上方所示。

3.2. 岩崩、泥石流、洪水事件的历史事件的记录列表

表2是根据档案资料和历史上直接观测得到的岩崩、泥石流和洪水事件的频率。泥石流和洪水事件主要发生在Claretto、Marderello和Crosiglione河。岩崩主要发生在Rocciamelone地区，岩崩为前3条河流发生泥石流创造了条件，如表2中第二列所示。

总的来说，根据现有的数据，可以肯定的是岩崩和泥石流事件的累计数量在最后一个时期（2001—2017年）最高。根据地质和水文气象数据，该地区的灾难性侵蚀的频率呈上升趋势。几乎每年都有由融化的冰或雪造成的小岩崩。从2001年开始，记录到的频率越来越高，同

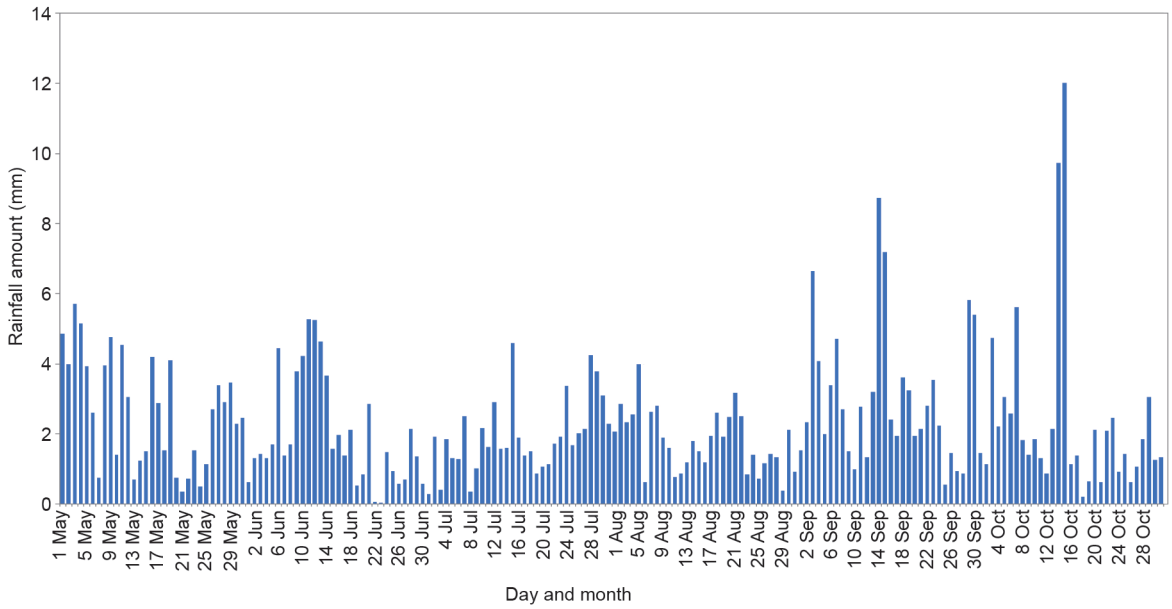

图2. 从5月1日到10月31日的平均每天降雨量，来自Pian Marderello的雨量计的24年间（1994—2017年）的记录。

表2 记录事件（即岩崩、泥石流、洪水事件）的历史频率和诺瓦莱萨市不同时间段的人口数量

Years interval	Rock-falls[a]	Debris flow[b]			Flooding events[b]			Novalesa mean population (inhabitants)
		Claretto	Marderello	Crosiglione	Claretto	Marderello	Crosiglione	
Prior to 1900	4	—	2	2	1	1	1	1243
1901—1920	1	—	—	—	1	1	0	1028
1921—1940	—	1	—	—	2	0	0	759
1941—1960	—	3	4	1	1	2	1	689
1961—1980	—	—	1	0	1	1	0	596
1981—2000	3	1	8	0	1	2	0	541
2001—2017	13	3	17	3	2	4	2	554

[a] Rock falls are associated with the Mt. Rocciamelone area and affect the three monitored rivers (Claretto, Marderello, and Crosiglione), creating debris availability.
[b] Debris flows and flooding events are associated with the three rivers.

时，2005年春季和夏季观察到的事件见证了地质下降过程[19]。

由于降雨和积雪的覆盖，山坡上的地表岩屑通常处于潮湿的环境中，这更容易造成侵蚀或山体滑坡的发生。每年的4~9月特别容易观察到这种现象。这几个月是皮埃蒙特地区一年中暴风雨发生的时期，7月发生频率达到最高峰[36]。同样的研究表明，暴风雨易受太阳辐射的影响，记录到的最大频数发生在协调世界时（UTC）13点左右（通常是在当地时间正午）。

在这种气象条件下，通常不超过0.02~0.04 $m^3 \cdot s^{-1}$的流量可以上升到180 $m^3 \cdot s^{-1}$（这是2015年8月14日记录到的最高峰值）。这时河流中经常有水和岩石的混合物，但大岩块（1000 m^3）在下游出现得并不频繁。表3中给出了3条河流（Claretto、Marderello和Crosiglione）处1994年的泥石流发生频率。在过去的几十年里，全球范围内泥石流事件逐渐增多，但Marderello河流在2001—2017年间的发生频率最高。

诺瓦莱萨地区记录了几个世纪以来发生的洪水事件，其中最古老的洪水可以追溯到1664年。Marderello河是洪水事件发生次数最多的河流，在1981—2000年期间达到顶峰（8次）。洪水事件发生频率次之（Marderello 6次，Claretto 4次）的是1941—1960年期间。相反，Crosiglione河流受洪水的影响较小。

3.3. 诺瓦莱萨的社会经济发展以及气象和水文地质风险增加的可能影响

从1861年开始（即意大利全国统一的那年），人口数据根据不同的时间段划分（1900年之前、1901—1920年、1921—1940年、1941—1960年、1961—1980年、1981—2000年、2001—2017年）。每个时间段的居民平均人数在表2的最后一列中显示。诺瓦莱萨社区人数呈现下降趋势，在过去的20年里只有很小的增长迹象。社区的衰落始于20世纪，这与都灵地区的工业发展是一致的。人口数量也受到两次世界大战的影响。经济危机（1929年）是影响诺瓦莱萨以及世界其他地区人口的第二个因素。国家人口普查数据库最近的人口普查（2011年）显示诺瓦莱萨社区有560名居民，平均每平方公里人数为20人。与阿尔卑斯山的平均人口密度为每平方公里74.6人（2013年）相比，诺瓦莱萨是一个人口稀少的地区。此外，诺瓦莱萨所属的阿尔卑斯山区，人口数量的减少造成了出生率下降及人口老龄化加剧[17]。

人口变化趋势主要受到宏观经济因素的影响。在20世纪之前，洪水事件和泥石流已经被记录在当地的编年史中。唯一的例外可能是1981—2000年Marderello河上发生了更频繁的洪水事件。因此，社区似乎对环境变化的恢复能力强于对经济因素变动的恢复能力。然而，这些年来收集的社会经济数据越来越少，因此对任何陈述都应持谨慎态度。

目前不能对环境和社会经济之间的相关性进行任何有意义的统计研究。直到最近（1994年），山区环境的极端条件使得环境数据的收集工作开始艰难地进行。如前所述，人口数据仅从1861年起每10年才有记录，而历史数据则是根据编年史收集的。从其他研究中收集的系统经济数据（不是直接获得的，因为它们属于意大利国家统计研究所所有，而且没有任何公开形式）只包含了最近几年（2003—2013年）。然而，通过对整个阿尔卑斯山区（包括法国、意大利、瑞士、列支敦士登、斯洛文尼亚、奥地利、德国这几个国家）过去10年的研究，得到了一些更清晰的经济细节。值得说明的是，以下社会经济变量也包括在研究中[17]：就业率、就业率变化（10年）、失业率及受过高等教育的人口。最近的另一项研究详细说明了社会经济衰退的引发因素（如缺乏获得

资源、教育、医疗和谋生的机会）[37]，这项研究分析了2003—2013年整个阿尔卑斯山区的经济状况。研究结果表明，对于包括诺瓦莱萨市在内的地区来说，有3个主要问题可能会引发负面的经济状况，即老年人口比例较高，就业率较低，受教育程度高的人比例较低。

畜牧业、农业、手工业和旅游业也得到了ES的支持，是诺瓦莱萨的主要经济活动。畜牧业是该地区根深蒂固的经济活动，与季节性牲畜移动文化有关（即在一个季节性循环中，将牲畜从一个牧场迁移到另一个牧场，通常冬季在低地夏季在高地）。值得注意的是，39%的意大利乳制品和11%的意大利肉制品来自意大利北部的高寒牧区[38]。现有农场（46个可用的农场，其中有13个已废弃了几十年）集中在山坡的南部，因为此处有更高的地表水供应量，且更易受到太阳辐射。此外，本研究也考虑了农民使用的29间房屋。因此，房屋（29间）和农场（59个，其中46个是可用的）总数是88，农场和房屋的位置在图3中用黑点表示。

气候条件影响了畜牧业的发展。最近几年干旱袭击了意大利北部的几个地区，如果干旱持续下去，未来将不能持续放牧。并且，山区农场发生泥石流的频率越来越高，这将造成长期的破坏，也降低了诺瓦莱萨山区的恢复能力。此外，GSD正影响着Rocciamelone区，产生了更多的岩石碎屑。因此，在极端降水事件增多的情况下，所有支持该地区经济活动的ES都可能受到严重影响。一项研究表明，强烈的降雨会以不同的方式减少ES的供应，并会持续数年，需要巨额的经济投资恢复山区的发展[39]。

即使地方市政府非正式地发布了诺瓦莱萨地区的农业活动，但农业资料（产品和经济活动）目前还没有。过去的研究表明，与热相关的风险可能会影响较低的农田和牧场，而与水相关的问题可能对较高的地区越来越重要[40]。值得注意的是，气候变化是影响农业的唯一因素。通过对意大利阿尔卑斯山区和整个欧洲高山地区的综合分析，土地使用和土地覆盖变化可能与气温上升一样严重，最终结果取决于气候变化趋势[41]。

手工业资料也不完整。通过出售传统手工制品获得经济发展的可能性往往依赖于旅游流量。因此，在规划山地社区的社会经济活动时，应仔细考虑旅游业。本文案例研究的高山旅游业与滑雪无关，但与登山活动以及旅游文化有关。先前的研究表明，潜在自然灾害的频率和强度极大地影响了旅游业，特别是在旅游业成本过高的情况下[42]。此外，旅游流量与若干个气候指数（特别是温度）有关[43]。事实上，与较温暖的地区相比，较寒冷的国家可能更有吸引力。参与式过程和建模输出

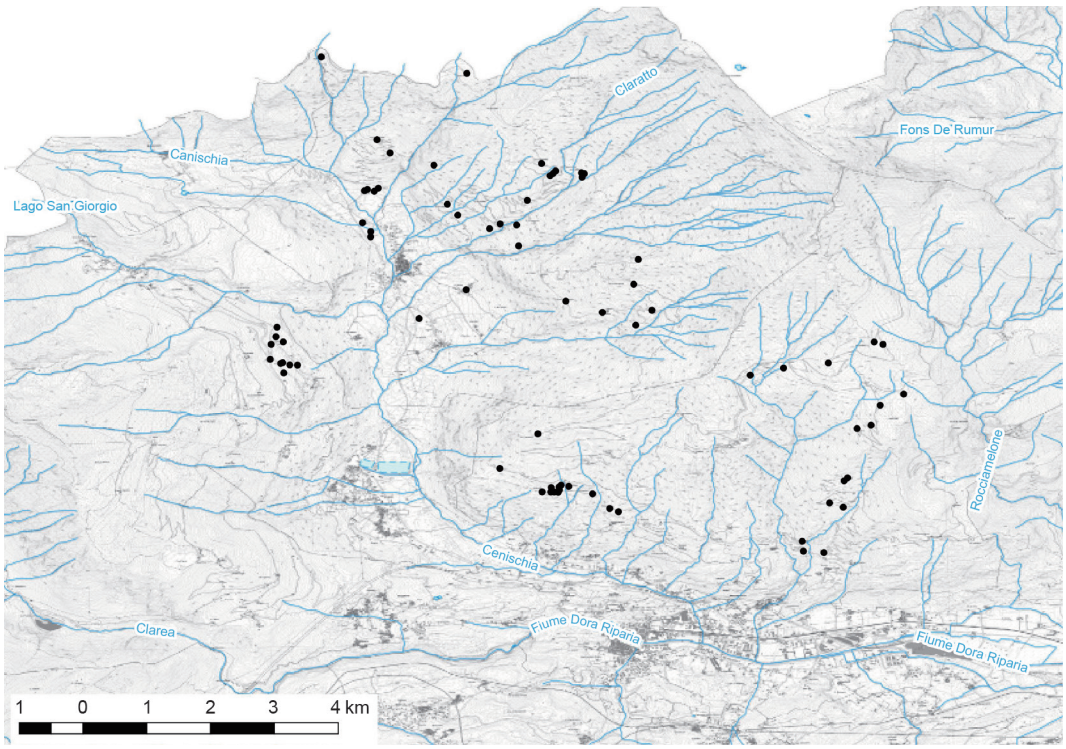

图3. 诺瓦莱萨市周围的山地农场（59个，其中46个是可用的）和房屋（29间）的位置图。

的综合运用可能会触发决策过程的有效性，以可持续的解决方案来应对山区环境中的气候变化[44]。

社会经济因素对诺瓦莱萨人口动态变化的影响占主导地位。然而，未来诺瓦莱萨人口动态变化对环境的依赖（主要取决于气候变化的区域效应）可能会增加，也会影响到ES的可用性。根据我们之前得到的结论，降雨量在逐渐减小，降雨强度在逐渐增加，而水文地质过程（即岩崩和泥石流）似乎在加速。因此，正如最近一项研究假设的那样[45]，在环境变化的情况下，劳动力迁移可能成为唯一的解决方案。提供更多的社会和经济数据可以增加必要的信息，有助于采取适当措施降低山地社区的脆弱性。新获得的信息可以进一步揭示经济活动与环境条件变化之间的相关性。一些定量的细节可能是非常有用的，这包括更详细的人口统计数据（如每个年龄段的人口分布）、与人口年龄分布相关的个人收入、按经济活动分组的当地分散化的货币流动、就业率、获得的服务（如教育、医疗等）。

当诺瓦莱萨社区的脆弱性受到环境因素的强烈影响，环境监测和其他地理信息系统（GIS）中的地理空间工作流程和来源信息的交换，以及GIS数字化基础设施，将是未来气候变化情景下景观规划的基础。这就是为什么数据收集、精细化和整合对于研究景观和气候变化趋势，以及为山区未来的生计选择适当的规划方案很重要。应当以适当的方式来选择监测方法，以推断正在进行的景观改变。混合使用航空和卫星平台已经显示出这一研究目的的有效性 [46–50]。更好地利用数字化基础设施可以用于开发未来多用户工作流程，增强环境监视活动中的透明度、信任度和再现性。

数据的收集和共享十分重要，是制定可持续规划的基础。同时，不同组织之间的合作对于制定区域可持续发展计划非常重要，有助于加强对地方或区域环境和社会经济驱动因素的理解[51]。此外，区域可持续性研究的经验共享提高了实际政策实施的效果[52]。

温度和降雨是最相关的气象变量，这些数据还需要进一步收集。特别是在降雨测量方面，PLUDIX可以提供较详细的降雨记录和临时预报，如现在天气传感器（PWS）功能[53]，并且在极端事件和高山环境中也可以进行操作[54]。DSD数据可与暴风雨的雷达或卫星遥感数据相结合，以推断降雨的动力学和微观物理性质，并应用于水文地质研究以确定降雨动能和侵蚀力[55]。此外，还应收集雪和冰层覆盖的数据。另一方面，根据另一个研究小组在过去几个月进行的监测活动，未来可能会对永久冻土层的数据进行收集研究。

应该对水压和水质做进一步研究。山区的人为活动和水资源之间存在着很强的耦合关系[56]。需要对地表河流的水位和流量进行连续测量，并对现有地下水进行量化。我们以前没有考虑过研究区域的水质问题，应该将其纳入未来的调查中。如之前的研究[57]所示，通过对基本水质参数[如生化需氧量（BOD）、浊度、水体的富营养化等]和水环境地球化学特性（如pH值、离子浓度等）的研究，可以确定人类活动是否在改变水体。同时，对畜牧业活动对水质的影响、水体中污染物和养分的潜在运输以及污染的转移（如从空气到水或从水到土壤）也应当进行定义和建模[58,59]。

应当制定相关政策以应对气候变化条件下山区生态系统的脆弱性问题。一项研究表明，全球化的加强尤其威胁山地社区和山地环境[60]。早期的景观和经济规划被认为是对当前情景的恰当解答。在经济活动方面，应该适当利用山地社区人民对资源再利用和循环利用的传统的积极态度，而这种积极态度是循环经济的支柱。新形式传统行业，如休闲农业，可能是促进地区发展的未来选择，同时也会鼓励当地生态旅游的发展[61]。

4. 结论

山地社区的生计严重依赖于环境条件，因此气候变化会导致ES可用性的降低，也可能会影响生物多样性并导致自然灾害的发生，如洪水事件和斜坡失稳现象。我们以意大利阿尔卑斯山区作为研究案例，该地区经历了逐渐增加的极端降水和侵蚀现象，社区的发展十分依赖于对自然资源的直接利用。

根据历史记录，灾难性侵蚀的发生频率产生了变化，在气候变化的情况下可能会进一步改变，其特点是降水事件增加，但总降雨量减少。对社会资料的分析使我们得出了两种结论：第一种结论不明显，即山地社区更容易受到外部社会经济条件的影响；另一种结论应做进一步分析，即气候变化增加了社区对ES的强烈依赖，也增加了社区对外部经济因素的依赖。不管是哪种结论，结果表明，未来的经济状况都会受到气候因素的影响。因此，在环境数据收集和精细化的基础上再进行详细的情景规划是必要的。

这些结论不仅仅适用于诺瓦莱萨社区，也适用于占地球表面约20%的其他山区，这些山区为约半数的全球人口提供了水、能源、矿产、森林和农产品[45]。此外，

正如《巴黎协定》[†]所指出的，保护TEK对于逐渐适应变化的环境条件是非常重要的。

未来的研究既可以在当地收集更完整的数据，也可以对比世界各地不同社区的数据。当多学科研究可用性的限制能够得到及时的克服，山地社区的恢复力将有助于将山地社区人口维持在全球人口的10%左右，这也是未来山区中贫困地区经济发展的一个重要机遇。

Acknowledgements

This work is supported by the China 111 Project (B17005). Massimiliano Lega acknowledges the financial support received by the Parthenope University of Napoli under "Bando di sostegno alla ricerca individuale per il triennio 2015–2017." Finally, the authors would like to thank the Novalesa municipality administration and the monastic community of Novalesa Abbey for all the material and spiritual support that was provided through the years as we developed our investigation. This project was partly supported by the U.S.–Italy Fulbright Commission and Parthenope University through a Fulbright Scholar grant to Theodore Endreny.

Compliance with ethics guidelines

Massimiliano Lega, Marco Casazza, Laura Turconi, Fabio Luino, Domenico Tropeano, Gabriele Savio, Sergio Ulgiati, and Theodore Endreny declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Steffen W, Persson A, Deutsch L, Zalasiewicz J, Williams M, Richardson K, et al. The Anthropocene: from global change to planetary stewardship. Ambio 2011;40(7):739–61.
[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. In: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, editors. Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. p. 688.
[3] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science 2015;347(6223):1259855.
[4] Casazza M, Liu G, Ulgiati S. The tenth planetary boundary: to what extent energy constraints matter. J Environ Account Manage 2016;4(4):399–411.
[5] Palomo I. Climate change impacts on ecosystem services in high mountain areas: a literature review. Mt Res Dev 2017;37(2):179–87.
[6] Kohler T, Wehrli A, Jurek M, editors. Sustainable mountain development series. Bern: Center for Development and Environment, Swiss Agency for Development and Cooperation, and Geographica Bernensia; 2014.
[7] Mountain Research Initiative EDW Working Group. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nat Clim Chang 2015;5(5):424–30.
[8] Haida C, Rüdisser J, Tappeiner U. Ecosystem services in mountain regions: experts' perceptions and research intensity. Reg Environ Change 2016;16(7):1989–2004.
[9] Rodríguez-Labajos B. Climate change, ecosystem services, and costs of action and inaction: scoping the interface. Wiley Interdiscip Rev Clim Chang 2013;4(6):555–73.
[10] Wang H, Zhou S, Li X, Liu H, Chi D, Xu K. The influence of climate change and human activities on ecosystem service value. Ecol Eng 2016;87:224–39.
[11] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice IC, Araújo MB, Arnell NW, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. Science 2005;310(5752):1333–7.
[12] Schirpke U, Kohler M, Leitinger G, Fontana V, Tasser E, Tappeiner U. Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience. Ecosyst Serv 2017;26:79–94.
[13] Mina M, Bugmann H, Cordonnier T, Irauschek F, Klopcic M, Pardos M, et al. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. J Appl Ecol 2017;54(2):389–401.
[14] Briner S, Huber R, Bebi P, Elkin C, Schmatz D, Grêt-Regamey A. Trade-offs between ecosystem services in a mountain region. Ecol Soc 2013;18(3):35.
[15] Ingty T. High mountain communities and climate change: adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions. Clim Change 2017;145(1–2):41–55.
[16] Archie KM. Mountain communities and climate change adaptation: barriers to planning and hurdles to implementation in the Southern Rocky Mountain Region of North America. Mitig Adapt Strategies Glob Change 2014;19(5):569–87.
[17] Permanent Secretariat of the Alpine Convention. Demographic changes in the Alps Report on the state of the Alps. 5th ed. Innsbruck: Permanent Secretariat of the Alpine Convention; 2015.
[18] Permanent Secretariat of the Alpine Convention. Transport and mobility in the Alps Report on the state of the Alps. Innsbruck: Permanent Secretariat of the Alpine Convention; 2007.
[19] Turconi L, De SK, Tropeano D, Savio G. Slope failure and related processes in the Mt. Rocciamelone area (Cenischia Valley, Western Italian Alps). Geomorphology 2010;114(3):115–28.
[20] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides 2008;5(1):3–17.
[21] Salvati P, Petrucci O, Rossi M, Bianchi C, Pasqua AA, Guzzetti F. Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy. Sci Total Environ 2018;610–611:867–79.
[22] Tropeano D, Turconi L. Using historical documents for landslide, debris flow and stream flood prevention. Applications in Northern Italy. Nat Hazards 2004;31(3):663–79.
[23] Turconi L, Coviello V, Arattano M, Savio G, Tropeano D. Monitoring mud-flows for investigative and warning purposes: the instrumented catchment of Rio Marderello (North–Western Italy). In: Lollino G, Arattano M, Rinaldi M, Giustolisi O, Marechal JC, Grant GE, editors. Engineering geology for society and territory. Switzerland: Springer; 2015. p. 85–90.
[24] Theule J, Crema S, Marchi M, Cavalli M, Comiti F. Exploiting LSPIV to assess debris-flow velocities in the field. Nat Hazards Earth Syst Sci 2018;18(1):1–13.
[25] Turconi L, Tropeano D, Savio G. Debris flows in the Marderello catchment in summer 2005 (Cenischia Valley, Western Italian Alps): a critical rainfallprocess analysis. Wildbach und Lawinenverbau 2008;72:42–61. German.
[26] Versteegh K. The Arab presence in France and Switzerland in the 10th century. Arabica 1990;37(3):359–88.
[27] Grilletto R. Brief note: the "Crânes cloués" of the abbey of Novalesa (Turin, Italy). Bull Mem Soc Anthropol Paris 1986;3(1):47–50. French.
[28] Coviello V, Arattano M, Turconi L. Detecting torrential processes from a distance with a seismic monitoring network. Nat Hazards 2015;78(3):2055–80.
[29] Tropeano D, Turconi L. Evaluation of debris potential in small basins of western and central Alps. Rome: CNR-IRPI/GNDCI; 1999. Italian.
[30] Llasat MC, Llasat-Botija M, Prat MA, Porcu F, Price C, Mugnai A, et al. Highimpact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database. Adv Geosci 2010;23:47–55.
[31] Boschetti M, Stroppiana D, Brivio PA, Bocchi S. Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. Int J Remote Sens 2009;30(18):4643–62.
[32] Casazza M, Piano A. Intense events of rainfalls in Piemonte. Ann Geophys 2003;46(2):235–40.
[33] Brunetti M, Maugeri M, Monti F, Nanni T. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. Int J Climatol 2006;26(3):345–81.
[34] Norrant C, Douguédroit A. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950–2000). Theor Appl Climatol 2006;83(1–4):89–106.
[35] Brunetti M, Maugeri M, Nanni T, Navarra A. Droughts and extreme events in

[†] http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.

regional daily Italian precipitation series. Int J Climatol 2002;22(5):543–58.
[36] Davini P, Bechini R, Cremonini R, Cassardo C. Radar-based analysis of convective storms over northwestern Italy. Atmosphere 2012;3(1):33–58.
[37] Barua A, Katyaini S, Mili B, Gooch P. Climate change and poverty: building resilience of rural mountain communities in South Sikkim, Eastern Himalaya, India. Reg Environ Change 2014;14(1):267–80.
[38] Permanent Secretariat of the Alpine Convention. Alpine agriculture. Innsbruck: Permanent Secretariat of the Alpine Convention; 2017.
[39] Tomczyk AM, White PC, Ewertowski MW. Effects of extreme natural events on the provision of ecosystem services in a mountain environment: the importance of trail design in delivering system resilience and ecosystem service co-benefits. J Environ Manage 2016;166:156–67.
[40] Fuhrer J, Smith P, Gobiet A. Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions—a case study in the Swiss Rhone catchment. Sci Total Environ 2014;493:1232–41.
[41] Tasser E, Leitinger G, Tappeiner U. Climate change versus land-use change—what affects the mountain landscapes more? Land Use Policy 2017;60:60–72.
[42] Nepal SK. Mountain tourism and climate change: implications for the Nepal Himalaya. Nepal Tour Develop Rev 2011;1(1):1–14.
[43] Rosselló-Nadal J. How to evaluate the effects of climate change on tourism. Tour Manage 2014;42:334–40.
[44] Bonzanigo L, Giupponi C, Balbi S. Sustainable tourism planning and climate change adaptation in the Alps: a case study of winter tourism in mountain communities in the Dolomites. J Sustain Tour 2016;24(4):637–52.
[45] Milan A, Gioli G, Afifi T. Migration and global environmental change: methodological lessons from mountain areas of the global South. Earth Syst Dynamics 2015;6(1):375–88.
[46] Lega M, d'Antonio L, Napoli RMA. Cultural heritage and waste heritage: advanced techniques to preserve cultural heritage, exploring just in time the ruins produced by disasters and natural calamities. In: Popov V, Itoh H, Mander U, Brebbia CA, editors. Management and the environment V. Ashurst Lodge: WIT Press; 2010. p. 123–34.
[47] Gargiulo F, Persechino G, Lega M, Errico A. IDES project: a new effective tool for safety and security in the environment. In: Wang G, Zomaya AY, Martinez Perez G, Li K, editors. Algorithms and architectures for parallel processing. Cham: Springer; 2013. p. 201–8.
[48] Lega M, Persechino G. GIS and IR aerial view: advanced tools for the early detection of environmental violations. In: Brebbia CA, Passerini G, Itoh H, editors. Management and the environment VII. Ashurst Lodge: WIT Press; 2014. p. 225–35.
[49] Errico A, Angelino CV, Cicala L, Persechino G, Ferrara C, Lega M, et al. Detection of environmental hazards through the feature-based fusion of optical and SAR data: a case study in southern Italy. Int J Remote Sens 2015;36(13):3345–67.
[50] Wang SY, Zhang XX, Zhu D, Yang W, Zhao JY. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology. Prog Geog 2016;35:1269–78. Chinese.
[51] Sharma A, Kearins K. Interorganizational collaboration for regional sustainability: what happens when organizational representatives come together? J Appl Behav Sci 2011;47(2):168–203.
[52] Mukhopadhyay P, Nepal M, Shyamsundar P. Building skills for sustainability: a role for regional research networks. Ecol Soc 2014;19(4):45.
[53] Prodi F, Caracciolo C, D'Adderio LP, Gnuffi M, Lanzinger E. Comparative investigation of Pludix disdrometer capability as present weather sensor (PWS) during the Wasserkuppe campaign. Atmos Res 2011;99(1):162–73.
[54] Porcù F, D'Adderio LP, Prodi F, Caracciolo C. Rain drop size distribution over the Tibetan Plateau. Atmos Res 2014;150:21–30.
[55] Casazza M. Some metrological limitations to rain impact computation in storm erosivity as defined in the Revised Universal Soil Loss Equation, version 2 (RUSLE2). J Environ Acc Manage 2016;4(1):37–44.
[56] Ling H, Xu H, Fu J. Changes in intra-annual runoff and its response to climate change and human activities in the headstream areas of the Tarim River Basin, China. Quat Int 2014;336:158–70.
[57] Casazza M, Maraga F, Liu G, Lega M, Turconi L, Ulgiati S. River water quality and its relation with air quality: a long-term case study in a remote and pristine NW Italian headwater catchment. J Environ Acc Manage 2017;5(1):35–47.
[58] Lega M, Endreny T. Quantifying the environmental impact of pollutant plumes from coastal rivers with remote sensing and river basin modelling. Int J Sustain Dev Plan 2016;11(5):651–62.
[59] Li H, Yang Z, Liu G, Casazza M, Yin X. Analyzing virtual water pollution transfer embodied in economic activities based on gray water footprint: a case study. J Clean Prod 2017;161:1064–73.
[60] Brunner SH, Grêt-Regamey A. Policy strategies to foster the resilience of mountain social-ecological systems under uncertain global change. Environ Sci Policy 2016;66:129–39.
[61] Jia Z, Qin A, Jia H. Research on the development of leisure agriculture tourism in Yi County based on circular economy. Manage Eng 2014;15:72–6.