

基于空间异质性的秦岭水源涵养能力评价指标体系构建

张家熊，柳 笑，汪成成，宋进喜，黄 鹏，史宇娜，李 琦

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 秦岭作为我国的南北分界线,构建一套完整的评价监测指标体系和深入剖析其内在驱动因素,关注其内在机理是为推动秦岭生态环境保护再上一个新台阶的必要工作,也是为了全面掌握反映水源涵养功能的驱动机制及变化规律。研究提出了基于地理加权主成分分析(GWPCA)方法构建秦岭水源涵养能力评价指标体系,对 2010 年秦岭水源涵养能力一级指标和二级指标空间动态变化进行了分析,揭示其空间变化分布机理。基于 GWPCA,考虑气象因子、下垫面因子和社会因子的水源涵养效应,构建了包含 10 个空间变量的秦岭水源涵养能力指标体系。根据得出的结果将秦岭水源涵养能力等级划分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级,揭示秦岭水源涵养能力空间变化规律,并以此提出生态管理建议。结果表明,秦岭大部分地区水源涵养能力在高等级和较高等级上,占整个区域的 66.48%;部分经济发展区域和秦岭中部区域的水源涵养能力处于低与较低等级,极端气候事件和人类活动是造成其分布的主要原因。基于此方法构建的秦岭水源涵养能力指标体系,能够有效量化秦岭的水源涵养能力及其在空间上的异质性,并能明确主要驱动因子。

关键词: 水源涵养; 指标体系; GWPCA; 空间异质性

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0290-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.035

Construction of Water Conservation Capacity Evaluation Index System Based on Spatial Heterogeneity in Qinling Mountains

ZHANG Jiexiong, LIU Xiao, WANG Chengcheng, SONG Jinxi, HUANG Peng, SHI Yuna, LI Qi

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127)

Abstract: As the dividing line between the north and the south of China, it is necessary for the Qinling Mountains to construct a complete set of evaluation and monitoring index system. Its internal driving factors and internal mechanism should be studied to promote the ecological environment protection at a new level, and also to fully grasp the driving mechanism and changes of the water conservation function. In this study, an evaluation index system of water conservation capacity in the Qinling Mountains was proposed based on geoweighted principal component analysis (GWPCA). The spatial dynamic changes of primary and secondary indicators of water conservation capacity in the Qinling Mountains in 2010 were analyzed, and their spatial distribution mechanism were revealed. Based on GWPCA, considering the water conservation effects of meteorological factors, underlying surface factors and social factors, an index system of water conservation capacity in Qinling Mountains containing 10 spatial variables was constructed. According to the results, the water conservation capacity of the Qinling Mountains could be divided into five grades: low, lower, medium, high and higher. The spatial variation rules of water conservation capacity of the Qinling Mountains were revealed, and some suggestions for ecological management were put forward. The results showed that the water conservation capacity in most areas of Qinling Mountains was at high and higher levels, accounting for 66.48% of the whole region. The water conservation capacity in some economic development regions and the central region of Qinling Mountains is at low and low levels. Extreme climate events and human activities were the main reasons for its distribution. The index system of water conservation capacity in Qinling based on

收稿日期: 2022-04-20

资助项目: 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF-045); 陕西省水利科技计划项目(2020slkj-13)

第一作者: 张家熊(1999—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林水源涵养研究。E-mail: zhangjiexiong@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 宋进喜(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学、水资源及水环境研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn

this method could effectively quantify the water conservation capacity in Qinling and its spatial heterogeneity, and could clarify the main driving factors.

Keywords: water conservation; index system; GWPCA; spatial heterogeneity

党的十八大把生态文明建设纳入中国特色社会主义事业五位一体总体布局,秦岭作为我国的“中央水塔”,连接东西、和合南北,是中国顶级生态空间,素有“中华绿芯”“世界物种基因库”和“中华地理自然标识”的美誉。其绵延的峰峦如一道天然屏障,涵养着八百里秦川,并具有调节气候、保持水土、涵养水源、维护生物多样性等诸多功能。秦岭水源涵养能力的强弱,在内受到自然条件的影响,在外受到人类活动的影响。构建秦岭水源涵养评价指标体系有其必要性和科学性,是指导秦岭生态环境修复与开发、提升区域用水安全、提高水资源管理、解决复杂水问题的有力举措;同时也是认真贯彻落实绿色发展和生态文明建设等国家重大战略决策的具体体现,是为建设好美丽中国、保护和修复山水林田湖草生命共同体而实施的重大举措。

水源涵养指标体系已成为众多学者研究的热点,有通过蒙特利尔对祁连山水源涵养指标体系进行构建^[1]、评价指标法构建北京密云水库涵养上游水源涵养林指标体系^[2]、利用专家判断矩阵和层次分析法对武汉城市圈水源涵养功能构建指标体系^[3]、还有将层次分析法和模糊综合评价模型相结合对晋、陕、蒙砒砂岩区沙棘涵养水源功能进行评价^[4]等。但这些研究都未将水源涵养能力指标体系可视化和空间化,不能具体反映指标在水源涵养空间上的差异性和主导因子。

传统的主成分分析(PCA)是通过多元数据集的全局相关系数矩阵进行分解得到载荷^[5],将数据降维简化,分析最佳变量得到结果。这意味着传统使用的主成分分析有个前提,即指标之间的关系在空间上是恒定的。然而在空间应用中,标准的主成分分析通常只使用几个分量用来解释高维或多变量数据集的协方差结构(例如,提供 1 个低维的替代方案)。这些成分是原始变量的线性组合,有可能更好地理解数据中不同的变化来源和结构。在实际的野外环境中,由于地理过程的空间非平稳性和人类影响强度的差异,各指标之间的关系通常具有一定的空间变异性^[6]。当考虑某种空间异质性时,可以用地理加权的 PCA (GWPCA)代替标准的 PCA,解释多元数据结构中的空间异质性^[7]。GWPCA 研究了主成分分析的输出在空间上是如何变化的,可以评估有效的数据维数是如何在空间上变化和原始变量是如何影响每个空间变化的分量,较前方法具有优势性。

地理加权主成分分析(GWPCA)是传统使用的主成分分析的扩展,在 2011 年被学者^[6]提出。GWPCA 采用移动窗口加权方法对地理空间中的每个观测数据进行单独的 PCA 分析,从而考虑到地理数据集之间的空间变化关系^[7-8]。该方法可以揭示指标之间的空间变化关系,也是目前常用的 PCA 所忽略的^[9],更重要的是生成的加载数据可以用于根据当地环境情况导出区域评价指标状况。前人有利用 GWPCA 进行滑坡易感性测绘,提供的结果具有指导改善作用^[10];近年采用该方法在计算老挝的季节性水贫困指数表明,水贫困指数存在较大的时空差异^[11]。该技术也被广泛应用于多学科研究中,如社会结构^[7]、区域经济发展模式^[12]、淡水化学数据^[8]及土壤特征等领域,但还未在水源涵养能力评价中使用过,因此前人研究水源涵养指标体系还有不足。

本文以秦岭为研究对象,运用 GWPCA 在秦岭区域构建水源涵养能力评价指标体系,并利用 GIS 等空间分析技术将其可视化和空间化,对 2010 年秦岭水源涵养能力的空间异质性进行分析。研究的主要目标是量化秦岭的水源涵养能力及其在空间上受多元因子影响的分布特征和异质性,并根据结果识别不同区域上影响能力的主导因子,实现区域尺度上的水源涵养功能评估,为区域生态规划与协调提供参考。

1 研究区概况

1.1 地理位置

研究区为陕西境内的秦岭(图 1),即“陕西秦岭”,东连豫鄂,西接甘陇,南望巴蜀,北瞰关中。土地总面积约 5.79 万 km²,占陕西省总土地面积的 28%。秦岭区域涉及西安市、渭南市、宝鸡市、汉中市、安康市和商洛等 6 市所辖的 34 个县,地理坐标 32.0°—34.0°N, 106.0°—111.0°E,呈东西向条带延伸,海拔 159~3 772 m。北部以秦岭北坡山脚线为界;南部以汉江北岸为界,不包括汉中、安康盆地,以盆地的北缘为界;东、西两侧以省界为界。

1.2 自然环境

秦岭是众多支流的水源地,境内主要水系有渭河、南洛河、汉江、嘉陵江和丹江。秦岭森林茂密,山地众多,水资源丰富,多年平均径流量 2.26×10^9 m³,年平均气温 12~17℃,年均降水量 600~1 200 mm,年平均气温南高北低,降雨由北向南递增。秦岭特殊的地理位置和复杂的气候条件使得南北坡形成了差异明显的垂直带谱,种类繁多的植被类型和等多样化

的土壤类型。目前,秦岭地区严重的水土流失引发了水源涵养能力降低、水库淤积日趋严重、大量面源污染物进入江河等生态问题。同时,一些地方的生态脆弱与贫困叠加,粗放的生产方式对生态安全构成新的潜在威胁,因此需要进一步加强秦岭地区水土保持和生态建设力度。

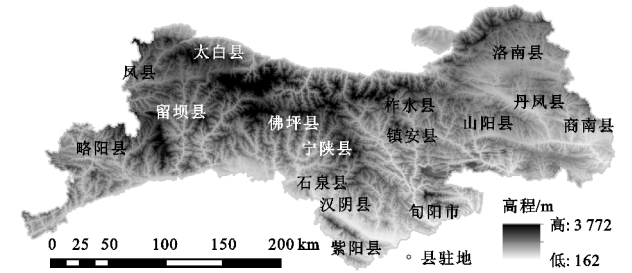


图 1 研究区概况

1.3 社会经济

在行政区划上,秦岭地区主要包括 6 个地级市 34 个县,常住人口总体呈现增长状。2010 年秦岭地区总人口达 1 593.58 万人,占全省总人口的 42.66%。有 55% 的县为国家级贫困县,农业人口居多,且人口分布极为不均,主要集中在河谷盆地和城镇,山区人口稀少且分散。2020 年,秦岭地区总人口增加到 2 872 万人,占全省总人口(3 955 万人)72.61%。

依据 2010 年和 2020 年的陕西省统计年鉴(<http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/>),秦岭区域 GDP 呈现整体增长的趋势。自 2010—2020 年,秦岭地区国内生产总值达到 17 585.25 亿元,占全省国内生产总值(29 181.86 亿元)的 60.26%。其中第一产业增加值到 1 418.63 亿元,第二产业增加值到 5 945.49 亿元,第三产业增加值到 9 573.65 亿元,分别占全省 GDP 的 62.56%,52.33%,76.27%。

2 数据来源与处理方法

依据相关文献和研究基础,DEM 数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>),分辨率为 30 m。同时通过国家气象科学数据中心网站(<http://data.cma.cn/>)收集 45 个气象站降水和蒸散发要素站点 22 个,通过彭曼公式计算各站点的潜在蒸散发量。土壤和植被数据来自于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

3 研究方法

3.1 秦岭水源涵养能力评估方法

地理加权主成分分析模型通过引入一系列的算式,将变量间地理位置的交互影响纳入到计算中,从而有效地解决多元数据中的空间异质性问题。识别空间变化主成分的最大因子载荷变量,并对主成分方差贡献率的局部空间分布特征进行可视化,优化地理加权回归的变量选择,即具体到每块网格内的驱动因素,为了解水源

涵养影响因素之间的空间异质性和识别网格驱动因素等信息具有科学和实践指导双重意义。

通过前期收集好的各项指标数据集,计算和处理并在 GIS 中进行掩膜提取和重采样为 1 km 的网格数据。在 GWPCA 中将所有变量整合起来,进行标准化处理,对指标在区域内的每个目标网格进行多元本地化统计,从而最小化变量中的空间自相关性和空间异质性。首先,将所有图像波段综合考虑,以提供多元局部统计;其次,以一种复杂的距离衰减加权方案取代移动窗口方法,在本地统计计算上提供一定程度的客观性在空间尺度上。通过这种方式 GWPCA 可以被用来创建纹理变量,这些纹理变量考虑多波段图像结构中的空间异质性。数据维数和多元结构的空

间变化可以通过 GWPCA 输出的地图来探索^[6-8]。根据 GWPCA 的输出可以说明数据维数的空间变化和多变量结构。基于提出的 GWPCA,在大范围目标网格上计算每组本地化的 PCA,从而通过这些局部化的 PCA 对每个网格上的值进行精确定位,并确定多变量数据集结构的局部变化。形式上,如果观察到的网格 i 有坐标 (u, v) ,则 GWPCA 包含观测变量的向量 X_i ,认为它与网格 i 有一定的依赖关系,其中 $u(u_i, v_i)$ 和 $\sum(u_i, v_i)$ 分别是局部均值向量和地理加权协方差矩阵。地理加权协方差矩阵表示为:

$$\sum(u_i, v_i) = X^T W(u_i, v_i) X \quad (1)$$

式中: X 为地理单元样本点数据矩阵(n 行表示观察值, m 列表示变量); $W(u_i, v_i)$ 为地理权重的对角矩阵。本研究中,这些是通过 1 个双平方核函数公式(2)来计算的。

$$w_{ij} = \begin{cases} [1 - (\frac{d_{ij}}{r})^2]^2 & d_{ij} \leq r \\ 0 & d_{ij} > r \end{cases} \quad (2)$$

式中: r 为带宽的地理距离; d_{ij} 是为矩阵 x 中第 i 行和第 j 行网格之间的空间距离。在网格 (u_i, v_i) 处,通过公式(3)分解地理加权协方差矩阵得到局部主成分,并赋予局部特征值的对角矩阵和局部特征向量矩阵

$L(u_i, v_i) V(u_i, v_i) L(u_i, v_i)^T = \sum(u_i, v_i)$ (3)

$L(u_i, v_i)$ 为 1 个局部特征向量矩阵; $V(u_i, v_i)$ 为 1 个局部特征值的对角矩阵。通过公式(4)可得到局部主成分分数 $T(u_i, v_i)$ 的矩阵:

$$T(u_i, v_i) = X L(u_i, v_i) \quad (4)$$

基于计算的结果上并利用公式(5)计算一级指标和二级指标在空间上对秦岭水源涵养能力的权重占比^[7]。

$$C_i = \sum_{j=1}^n (\sum_{i=1}^m I_{ii} \times L_{ij}) \times V_j \quad (5)$$

3.2 秦岭水源涵养评估指标选取

合理的指标体系是进行秦岭水源涵养能力评价的

前提。在此之前,本研究明确研究秦岭区域的背景,以了解内部不稳定因素和外部干扰的联合效应,建立秦岭水源涵养能力评价指标体系。在秦岭水源涵养评价指标体系中包含一级指标和二级指标,一级指标中包含气象因子、下垫面因子以及社会经济因子(表 1)。气象因子由降水和潜在蒸散发组成。降水是区域陆地生态系统的主要水资源来源,直接影响水源涵养量的补给;潜在蒸散发是区域水资源循环和平衡的重要环节,表征秦岭区域在充分供水条件下的最大蒸发能力。下垫面因子中包括海拔、归一化植被指数、土壤饱和导水率、土壤有效持水量和土壤侵蚀力因子等重要指标。植被和土壤通过截留、渗透、积蓄等过程为水源涵养能力提供重要的支持。社会经济因子中包括国内生产总值(GDP)和人口密度,是为保护和合理利用森林资源提供价值依据,也是为进一步生态修复工程、改善秦岭环境质量把控方向。区域经济和人口密度是反映景观安全性的重要指标,其占比越大,森林资源、生态环境受破坏的可能性越大。

表 1 秦岭水源涵养能力评价指标体系

一级指标	编号	二级指标	指标属性(+/-)
气象因子	1	降水(P)	+
	2	潜在蒸散发(PET)	-
下垫面因子	1	海拔	+
	2	归一化植被指数(NDVI)	+
	3	土壤饱和导水率	-
	4	土壤有效持水量	+
	5	土壤侵蚀力因子	-
	6	土壤密度	-
社会经济因子	1	国内生产总值(GDP)	-
	2	人口密度	-

4 结果与分析

4.1 秦岭水源涵养能力评估指标等级空间分布规律

借鉴前人^[13-14]的研究基础和划分方法,以及参考《生态环境状况评价技术规范(HJ 192—2015)》^[15]中的评价分级,采用 GIS 分类方法中的自然分段法,将秦岭的水源涵养能力划分为低、较低、中等、较高、高 5 个等级(表 2)。图 2 为秦岭不同等级的水源涵养能力空间分布。水源涵养能力处于低等级(1.11~1.133)的区域主要分布在洛南县及山阳县以南地区;较低(1.33~1.55)与中等(1.55~1.78)水源涵养能力等级主要分布在秦岭东北的柞水县、镇安县、山阳县、丹凤县和洛南县;秦岭水源涵养能力高等级(2.00~2.23)分布在西部地区与西南部地区,少部分分布在秦岭东部的商南县地区;水源涵养能力较高等级(1.78~2.00)是秦岭片区分布最广泛的等级,主要分布在中部以南和东部地区。总体而言,秦岭水源涵养能力等级从低到高所占比例依次为 0.61%,10.30%,22.55%,39.80%,26.68%,其中秦岭

水源涵养能力较高与高等级占比之和达到 66.48%,说明该地区整体的水源涵养能力较强;同时,秦岭水源涵养能力整体自东向西逐渐增高。

表 2 秦岭水源涵养能力评估指标占比

评价指标范围	等级	占总面积百分比/%
1.11~1.33	低	0.61
1.33~1.55	较低	10.36
1.55~1.78	中等	22.55
1.78~2.00	较高	39.80
2.00~2.23	高	26.68

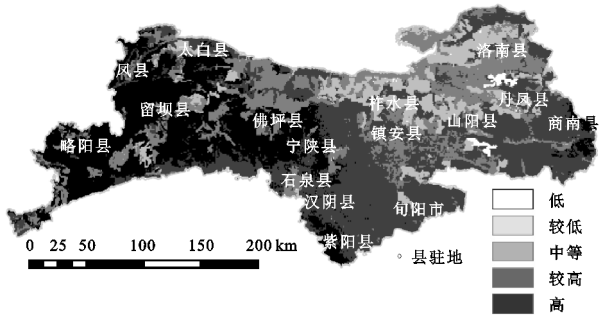


图 2 秦岭水源涵养能力评估指标等级空间分布

4.2 秦岭水源涵养能力评估一级指标空间异质性

水源涵养能力受到的影响因子较多,前人在其研究上将空间中每点的影响因子综合取平均值,并未能明确每一点空间的具体影响能力,导致在水源涵养评价中不能恰当地确定指标在空间上变化的相对重要性,水源涵养的空间分布格局不可避免地存在不确定性。因此,明确各级评价指标对秦岭水源涵养能力评估的贡献,可优化秦岭水源涵养服务功能,为秦岭生态保护和可持续发展提供理论基础,这对水源涵养的精确管理至关重要。本研究分析了一级指标中的气象因子、下垫面因子、社会经济因子对秦岭水源涵养能力空间异质性的贡献(图 3~图 5)。

秦岭的东部地区与西部地区降水差异较大,尤其在秦岭西段由于山脉走向和坡度变化,气象的垂直变化差异明显。气象因子对秦岭水源涵养能力的贡献自西向东逐渐降低,东部和西部地区相比减少的幅度较大,在秦岭西部及西南地区贡献占比最大,使该区域产生较强的水源涵养能力。秦岭水源涵养能力处于中低等级的区域的气象因子的占比贡献率较低,在贡献率占比高的区域水源涵养能力也较强。

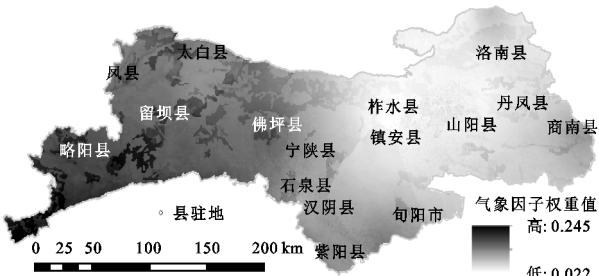


图 3 一级指标气象因子权重空间分布

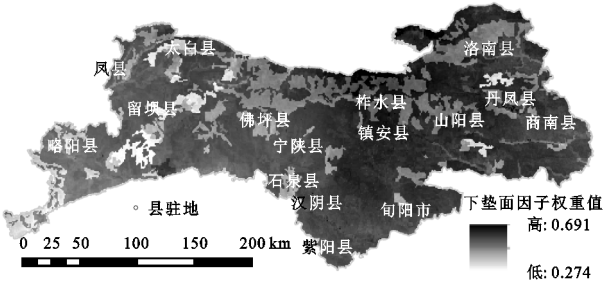


图 4 一级指标下垫面因子权重空间分布

不同的土壤类型导致土壤饱和导水率、土壤持水量和植被可利用的水量也不同,因此土壤类型的差异间接导致水源涵养功能在空间上具有异质性。依据下垫面因子分析可见,对秦岭水源涵养能力贡献占比最大的区域在秦岭东部地区,由东往西对秦岭水源涵养能力的贡献逐渐降低。秦岭水源涵养能力等级空间分布在西部地区处于中等区域的下垫面因子贡献占比低,在洛南县及山阳县以南水源涵养能力较低区域的下垫面因子贡献占比也较低。

在本研究的区域中,各个县区的经济发展质量各有差异,因而导致秦岭水源涵养在人类经济活动中受到的干扰程度也不同。本研究中的社会经济因子包括国内生产总值与人口密度,通过其贡献占比分布可以发现,在水源涵养能力属于低等级的洛南县及山阳县区域是社会经济因子占比最高的地方;分布在秦岭

西部地区留坝县附近水源涵养能力处于中等区域,社会经济因子占比也较高,说明人类经济活动是降低秦岭水源涵养能力的主要原因。

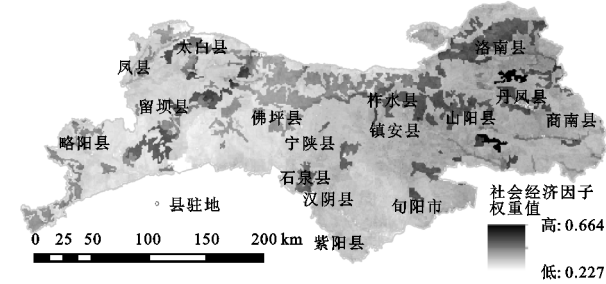


图 5 一级指标社会经济因子权重空间分布

4.3 秦岭水源涵养能力评估二级指标空间异质性

气象因子一级指标中包含降水和蒸散发 2 个二级指标,降水是水源涵养中主要的水资源供给来源,蒸散则是主要的输出项。下垫面因子中,土壤和植被要素指标对水源涵养能够起到保水、持水、固水、涵养水的作用。社会经济因子则是在社会发展进程中,人类活动对森林生态系统开发程度和保护程度的综合效应。通过 GWPCA 计算结果中,开展研究二级指标之间的空间异质性并得到其结果见图 6、图 7 和图 8。分析二级指标空间异质性对秦岭水源涵养评价等级结果的贡献能力占比,可为识别影响评价等级结果的驱动因素和生态保护上提供强有力的支持。

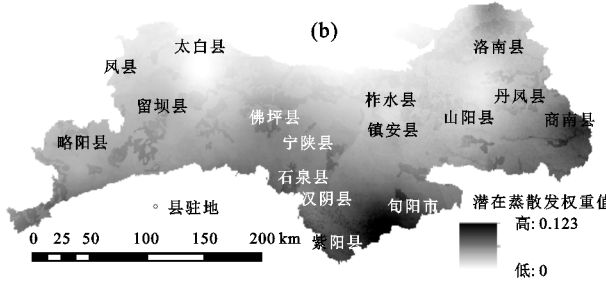
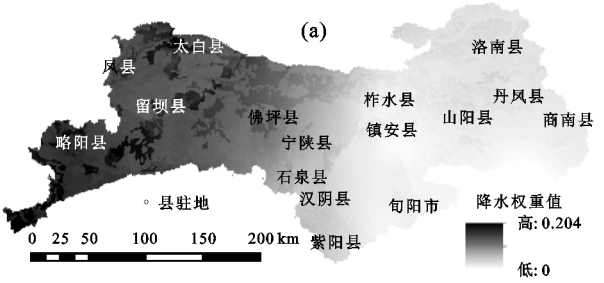


图 6 气象因子二级指标权重空间分布

在整体上,秦岭以西和西南区域的降水指标贡献占比较高,这些区域受到降水的影响较强,保证区域上的水量来源,说明该指标是区域水源涵养能力的关键驱动因素;另一方面,蒸散发在水源涵养评价较强的区域中贡献占比较低,主要集中在秦岭以南和东部地区。

植被归一化指数主要体现植被生长状况和植被层厚度情况;土壤有效持水量为在一定深度内能够贮藏并能被利用的水资源量,是土壤的一种固有的特性。在水源涵养能力评价较高和高的区域,植被归一化和土壤有效持水量贡献占比也高,是影响提高水源涵养能力的主要驱动因素。在海拔较高的地区,其持水和保水的能力也越强,贡献占比也越大。土壤饱和和导水率是表征土壤质地、容重、孔隙分布特征的指标,在秦岭水源涵养评价较高和高的等级区域内,该指标贡献占比处于较低水平。土壤密度占比越大,则表明

土壤质地越疏松,持水能力弱,该项指标贡献较大区域分布在评价等级较低的秦岭东部商南区域周围和洛南县附近。土壤侵蚀力因子表现土壤被搬运和剥削破坏的程度。土壤侵蚀贡献程度占比高的区域主要分布在水源涵养评价等级低和较低区域内,原因是这些地方的土壤水土流失受损较为严重,变化程度高,导致其保水、持水和涵养水能力低。

人口密度和国民生产总值体现为人类活动和区域的开发程度,在社会经济的发展中往往忽略对于生境的保护和改善。通过对二级指标的贡献占比发现,人口密度和国民生产总值贡献占比较大的区域内水源涵养能力评价等级相反较低,因此,社会经济也是影响降低秦岭水源涵养能力的驱动因素。

综上所述,通过对二级指标空间异质性贡献分析,识别出空间上每个网格内影响秦岭水源涵养的驱

动因素,解释了指标之间异质性的影响。其中区域水源涵养能力降低的驱动因素主要包括人口密度、国民

生产总值和土壤侵蚀因子;提升的驱动因素主要包括降水、植被归一化指数和土壤有效持水量。

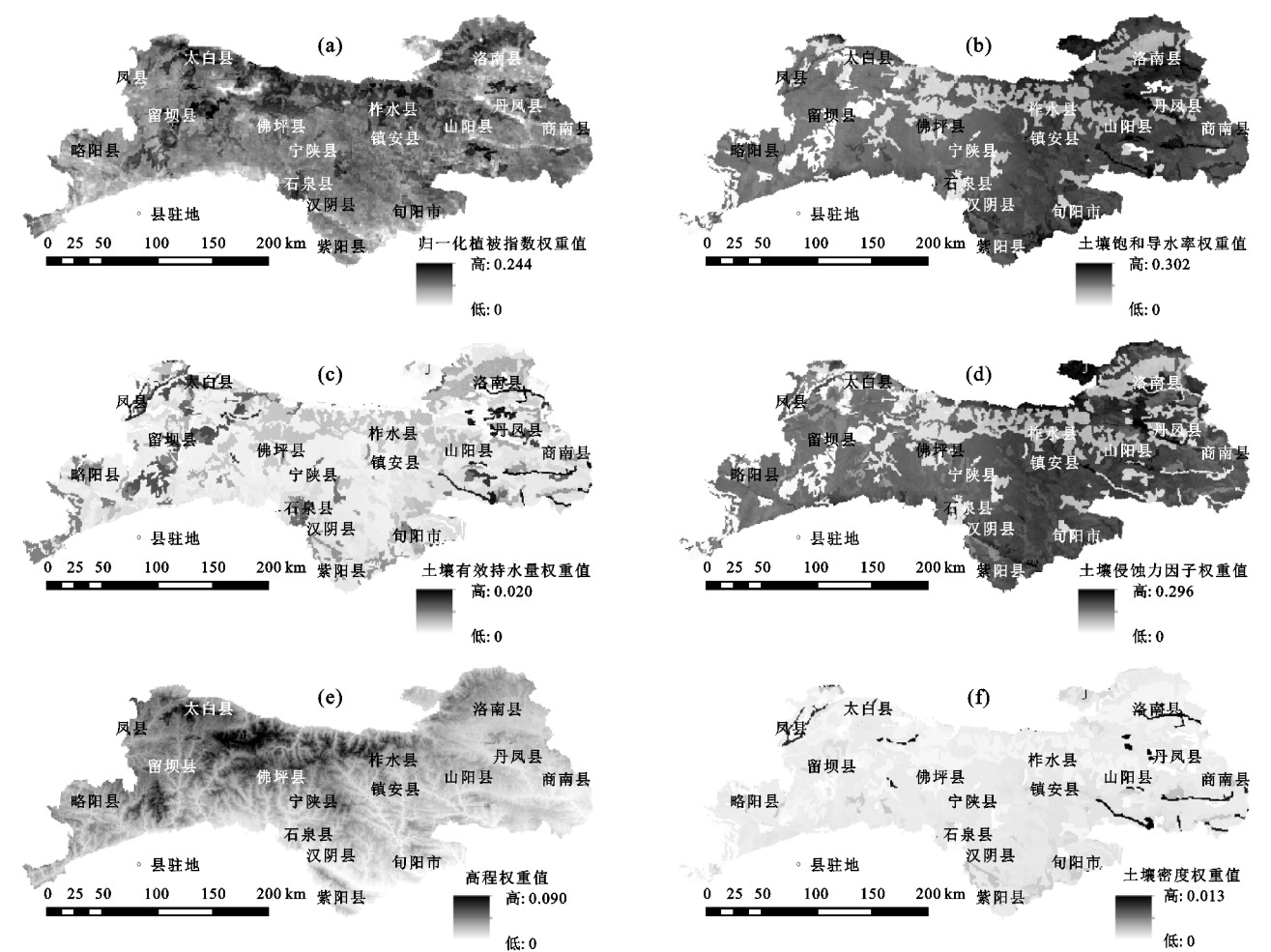


图 7 下垫面因子二级指标权重空间分布

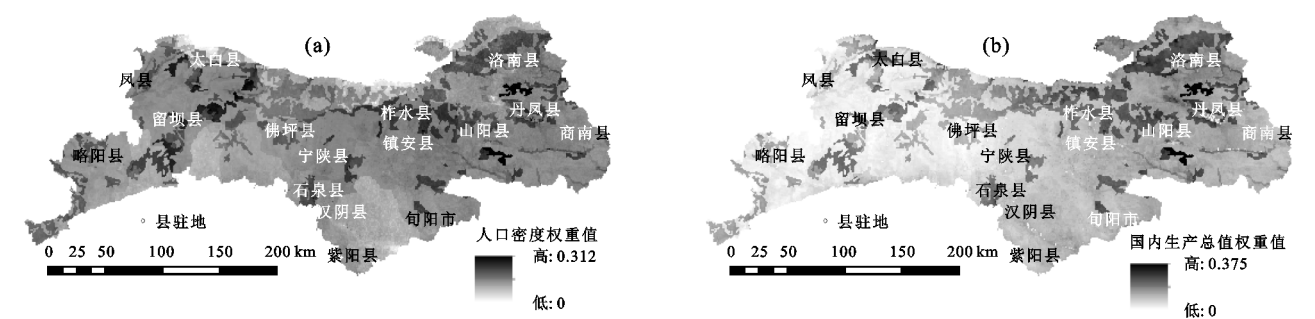


图 8 社会经济因子二级指标权重空间分布

4.4 秦岭水源涵养能力空间成因及验证分析

由于以往对整个研究区水源涵养指标体系的评价较少,因此考虑区域生态评价和历史观测的脆弱性事件和影响来验证结果,并以历史观测的脆弱性事件和影响为主要方式。

秦岭南北位于东亚季风区,60 年来秦岭北亚热带过渡带出现明显的攀升,秦岭以北“跨越式”地出现北亚热带气候格局^[16]。受地形影响,秦岭南北与东西降水量变化差异较大,西部大于东部,南坡多于北坡,季节性降水过程差异也很明显,东部地区在近 60 年降水量减少的幅度比西部地区大^[17]。秦岭地区气

温和降水年际波动非常大,不可避免出现极端气候事件对植被生态系统造成不利影响。

土壤是生态环境的一个重要组成部分,表层土壤的流失破坏植被生长,继而减小土壤覆盖度,加剧水土流失,减小调节气候和水循环的能力,生态环境恶化致使水源涵养能力下降。秦岭植被覆盖度空间分布特征为四周低、中间高^[18]。秦岭区域整体上从 2000 年开始植被覆盖度呈现明显的增加趋势,但是在秦岭以北地区由于经济发展迅速,大量植被遭受到破坏,呈现出明显减少的趋势^[19]。商洛市地处秦岭山区,洪涝灾害频发^[20],商洛县城以西区域 2010 年

的 7 月出现洪涝灾害引发较多泥石流灾害,洛南县以南由于严重的水土流失,年耕地损失 $1 \times 10^4 \text{ hm}^2$,且在汉中市毁林开荒面积达 $20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[21]。其他秦岭区域也多有水土流失灾害,柞水县区内滑坡、崩塌、泥石流时有发生,且分布广^[22],安康汉中登山间盆地边缘地带也是膨胀土滑坡的频发地段^[23]。秦岭以南地区的潜在蒸散发从北向南逐渐递减。整体上,秦岭以北区域的潜在蒸散发高于秦岭其他区域^[24]。

秦岭山区公路、铁路、矿山开采等生产建设活动中违规向河道弃土弃渣,再加上水土保持预防监督工作相对滞后,导致人为水土流失现象十分严重^[25]。秦岭北麓的建设用地扩张^[19];商洛市产业快速发展,道路建设过程中破坏和改变当地的地质结构,农业用地比例大,人类活动强烈^[20];山阳县由于地形起伏变化大,再加上人类活动的影响,区内滑坡、泥石流等地质灾害频发^[26],导致区域内水土流失与洪涝灾害多发,水源涵养功能减弱。人类活动是秦岭汉江上游径流量减少的主要原因,从而影响区域内的水源涵养能力^[27]。渭南、西安、宝鸡 3 市、16 个县、86 个乡镇的大约十余万农业人口,同时有数百家工业企业、采矿企业、旅游休闲服务企业以及难以计数的采石场,乱建、乱采、乱垦、乱伐和乱排放等现象相当严重。1990—2003 年留坝县生态环境质量变差的面积占总面积的 75.44%,生态环境质量等级转为差的居民地区域逐渐扩大,部分优良等级的植被区域转为良等级^[28]。

在时空变化下,秦岭地区多年来实施天然林保护、封山育林等生态环境恢复工程,有效地保护并改善了秦岭的生态状况。秦岭西部地区整体的水源涵养能力提高程度优于秦岭东部地区^[29]。2005—2010 秦岭北麓渭河流域退耕还林、还草面积较上一时期略有增加,分别为 $841.49, 6\,770.00 \text{ km}^2$,在此期间水源涵养总量和平均水源涵养量增长最快^[30]。

4.5 秦岭生态保护建议

低水源涵养能力的洛南县及山阳县以南地区应引起相关部门重视,给予必要保护措施,如建立水源涵养生态红线区管理制度,定时开展环境调研信息和风险源危害排查,加强地区联合治理,充分发挥政府舆论宣传作用等。较低与中等水源涵养能力的秦岭东北地区,应通过植树造林来改善地区的生态系统水源涵养能力、降低人类活动的影响、控制水土流失,增植水源涵养能力较强的植被类型,在森林覆盖率较小的地区,增加阔叶林的林地面积来提高水源涵养能力。高水源涵养能力的秦岭西部地区与西南部地区应严格把控城市经济的发展规模,科学合理地布局开发,发展节能节水型经济,

实现可持续发展。水源涵养能力较高等级是秦岭片区分布最广泛的等级,主要分布在中部以南和东部地区,应加大力度通过自然修复与人工植被建设相结合的手段,对碎片化严重的森林地区和山区植被进行恢复,以期能够提高该地区的水源涵养功能。

5 讨论

尽管本文在分析秦岭水源涵养能力方面得出一些结论,但是仍存在一些不足:(1)指标体系的类别涵盖不全面,导致计算该区域秦岭水源涵养能力有偏差;由于土地利用强度、叶面积指数、环境敏感性等自然状况以及自然保护区的划分管理等均会带来影响,且数据获取困难,本研究未对此进行分析。因此后续的研究在多类别指标数据的获取方面是研究顺利开展的关键因素。(2)秦岭誉为我国“中央水塔”,在我国生态保护中占有极高地位,不同的生态资源开发所产生的效果也不同,因此可以根据生态规划区建立保护红线,成为衡量秦岭区域生态安全的重要内容。(3)在研究过程中,收集了 2010 年的数据进行分析,陕西秦岭范围大,指标随时间的变化也大,可以收集更新(如 2019 年或 2020 年)和高分辨率的指标空间数据,在此基础上从多时空进行深入分析。

6 结论

本研究建立了秦岭全域水源涵养指标体系,进一步阐明秦岭水源涵养能力评估指标等级空间分布规律。通过考虑秦岭水文、气象、植被、下垫面等生态水文多要素及国内生产总值(GDP)、人口密度等社会经济要素,建立了反映秦岭水源涵养能力的指标体系。使用 GWPCA,在多变量结构中考考虑空间效应,可以在空间尺度上更客观地计算局部统计数据和秦岭水源涵养能力,在大尺度区域水源涵养能力评估中是一种很好的工具。秦岭大部分地区水源涵养能力在高等级和较高等级上,占整个区域的 66.48%,部分经济发展区域和秦岭中部区域的水源涵养能力处于低与较低等级。其中高等级的秦岭水源涵养能力区域主要受当地气象因子和下垫面因子影响,而低等级的秦岭水源涵养能力区域主要受社会经济因子的影响。本研究成果有助于以提高秦岭水源涵养能力提高为出发点,在空间规划上有机地统一生态资源开发、利用、管理及帮助生态经济决策,为秦岭的进一步生态保护和可持续发展提供重要的依据。

参考文献:

- [1] 黄海霞.祁连山水源涵养林可持续经营标准与指标体系的建立[J].甘肃林业科技,2002,27(2):15-18.

[2] 李金良,郑小贤.北京地区水源涵养林健康评价指标体系的探讨[J].林业资源管理,2004(1):31-34.

[3] 白杨,初冬,田良,等.武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究[J].地球信息科学,2014,16(2):233-241.

[4] 安宝利,张征,王举位,等.基于 AHP-模糊综合评价法的沙棘涵养水源功能评价[J].西北林学院学报,2012,27(2):39-43.

[5] 李莉娟,张娜.关于主成分分析的几种常用改进方法[J].统计与决策,2007(21):167-168.

[6] Harris P, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted principal components analysis[J].International Journal of Geographical Information Science, 2011, 25(10):1717-1736.

[7] Fotheringham A S, Rogerson P A. The sage handbook of spatial analysis[M]. London: SAGE Publications, 2009.

[8] Harris P, Clarke A, Juggins S, et al. Enhancements to a geographically weighted principal component analysis in the context of an application to an environmental data set[J].Geographical Analysis, 2014, 47(2):146-172.

[9] Chen Y, Peloso G M, Liu C, et al. Evaluation of population stratification adjustment using genome-wide or exonic variants[J].Genetic Epidemiology, 2020, 44:702-716.

[10] Sabokbar H F, Roodposhti M S, Tazik E. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis [J]. Geomorphology, 2014, 226:15-24.

[11] Kallio M, Guillaume J, Kumm M, et al. Spatial variation in seasonal water poverty index for Laos: An application of geographically weighted principal component analysis[J]. Social Indicators Research, 2018, 140:1131-1157.

[12] Li Z, Cheng J, Wu Q. Analyzing regional economic development patterns in a fast developing province of China through geographically weighted principal component analysis[J].Letters in Spatial and Resource Sciences, 2016, 9(3):1-13.

[13] 李乃强,徐贵阳.基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J].测绘通报,2020(4):106-110,156.

[14] 黎家琦,武雪玲,唐诗怡.压力—状态—响应模型下的生态敏感性分析算法[J].测绘科学,2020,45(11):75-83,106.

[15] 中华人民共和国生态环境保护部. HJ192—2015 生态环境状况评价技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2015.

[16] 陆福志,鹿化煜.秦岭—大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示[J].地理学报,2019,74(5):875-888.

[17] 杨凤梅,王乃昂,王式功,等.近 60 a 来西秦岭及周边地区降水的分布格局[J].干旱区地理,2015,38(5):867-879.

[18] 赵婷,白红英,邓晨晖,等.2000—2016 年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应[J].生态学报,2019,39(12):4499-4509.

[19] 汲玉河,周广胜,王树东,等.2000—2019 年秦岭地区植被生态质量演变特征及驱动力分析[J].植物生态学报,2021,45(6):617-625.

[20] 温晓金.恢复力视角下山区社会—生态系统脆弱性及其适应[D].西安:西北大学,2017.

[21] 苏亮,柳礼香.洛南县水土流失现状成因及治理对策探讨[J].地下水,2019,41(4):174-175.

[22] 上官超超,王雁林,姚翔龙,等.柞水县地质灾害分布规律及防治对策[C]//秦巴山区地质灾害与防治学术研讨会.秦巴山区地质灾害与防治学术研讨会论文集,西安,2015:130-132.

[23] 焦喜丽.陕西秦岭生态功能保护区地质灾害特征及其防治措施[J].陕西地质,2004,22(1):80-82.

[24] 李双双,张玉凤,张立伟,等.2000—2019 年秦岭南北实际蒸散发时空变化特征[J].地理科学进展,2021,40(11):1900-1910.

[25] 柳礼香,彭芳,寇龙.秦岭地区生态建设中水土流失的危害及对策[J].陕西水利,2017(5):80-81.

[26] 王昭,刘建红,李同昇,等.秦巴特困区生态脆弱性与经济贫困的耦合关系:以陕西省山阳县为例[J].生态学报,2019,39(11):3908-3917.

[27] 夏军,马协一,邹磊,等.气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):1-6.

[28] 胡克宏,张震.陕西秦岭山区留坝县生态质量时空特征及影响因素分析[J].生态与农村环境学报,2021,37(6):751-760.

[29] 卓静,何慧娟,邹继业.近 15 a 秦岭林区水源涵养量变化特征[J].干旱区研究,2017,34(3):604-612.

[30] 徐省超,赵雪雁,宋晓谕.退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响[J].应用生态学报,2021,32(11):3893-3904.