

秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局

范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 袁家根

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: [目的] 对秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能空间格局进行分析, 为该地区的水资源空间规划与管理, 均衡各流域的水资源分配及城市经济发展等提供科学参考。[方法] 基于 InVEST 模型从流域尺度分析秦岭北麓 2000 年和 2010 年的水源涵养能力与空间格局异质性, 并对水源涵养能力的影响因素进行分析。[结果] (1) 2000 年秦岭北麓水源涵养总量为 $4.02 \times 10^9 \text{ m}^3$, 平均水源涵养能力为 242.37 mm; 2010 年水源涵养总量为 $4.45 \times 10^9 \text{ m}^3$, 平均水源涵养能力为 265.33 mm。(2) 黑河、石头河、灞河和泾河流域为秦岭北麓主要的水源涵养区, 其高值区出现在黑河流域南部、石头河流域南部、神沙河流域、灞河流域南部小流域。(3) 气候因子与水源涵养能力密切相关, 土地利用/覆被通过植被面积变化影响到区域水源涵养功能的发挥, 从植被类型来看, 水源涵养贡献率最高的是落叶阔叶林; 从土壤属性来看, 棕壤的水源涵养贡献率最高。[结论] 区域的水源涵养能力受气候、土地利用方式、植被覆盖及土壤条件等的综合作用而产生差异。秦岭北麓的水源涵养能力总体表现为越靠近秦岭主脊水源涵养能力越强。

关键词: 水源涵养; InVEST 模型; 土地利用/覆被变化; 生态系统服务; 秦岭北麓

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0050-07

中图分类号: TV312.9, K903

文献参数: 范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 等. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 50-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.008; Fan Yaning, Liu Kang, Chen Shanshan, et al. Spatial Pattern Analysis on Water Conservative Functionality of Land Ecosystem in Northern Slope of Qinling Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 50-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.008

Spatial Pattern Analysis on Water Conservative Functionality of Land Ecosystem in Northern Slope of Qinling Mountains

FAN Yaning, LIU Kang, CHEN Shanshan, YUAN Jiagen

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] Analysis on spatial pattern of water conservative functionality of land ecosystem in the northern slope of Qinling Mountains to provide scientific reference for water resources planning and management, and balancing water resources allocation and urban economic development. [Methods] This paper analyzed the water conservation ability and the spatial heterogeneous pattern of the northern slope of Qinling Mountain at watershed scale in 2000 and 2010. Based on InVEST model, the influence factors of water conservation capacity were analyzed. [Results] (1) In 2000, the amount of water conservation in the northern slope of Qinling Mountains was $4.02 \times 10^9 \text{ m}^3$, superficial 242.37 mm in an average. In 2010, the amount of water conservation in the northern slope of Qinling Mountain was $4.45 \times 10^9 \text{ m}^3$, superficial 265.33 mm in an average. (2) The main water retention area in the northern slope of Qinling Mountain are Heihe River, Shitou River, Chanhe River and Bahe River basin. Their high value areas of water retention function located at some sub-watersheds, correspondingly as the souths of Heihe River, Shitou River, Shensha River and Bahe River. (3) Climate factor was found closely related to the ability of water conservation. Through the effect of

收稿日期: 2016-09-19

修回日期: 2016-10-18

资助项目: 环保部“全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查与评估项目: 陕西专题”(STSN-05-26); 国家林业公益性行业科研专项(201304309)

第一作者: 范亚宁(1992—), 女(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态评价与生态规划。E-mail: yaning017@163.com。

通讯作者: 刘康(1963—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域生态评价与规划, 植被地理, 景观生态学等研究。E-mail: liuk63@126.com。

vegetation change, land use/cover affected the regional water conservation function. For vegetation types, deciduous broad-leaved forest contributed the most proportion; for soil properties, brown soil had the highest contribution rate. [Conclusion] Water conservation capacity varied differently with regions by its comprehensive factors, such as climates, the way of land use, vegetation cover and soil conditions. In a word, the closer to the main ridge of Qinling Mountains, the stronger ability of water conservation in the northern slope of Qinling Mountains.

Keywords: water conservation function; InVEST Modle; LUCC; ecology system services; northern slope of Qinling Mountains

生态系统服务功能不但对维持自然生态环境的格局、过程具有重要意义而且其生态价值关乎人类福祉正逐渐受到人们的关注。而水资源作为城市发展的基础物质,生态系统的水源涵养能力对于城市的发展显得尤为重要。由美国斯坦福大学、世界自然基金会(WWF)和大自然保护协会(TNC)联合开发的生态系统服务功能综合评估和权衡的工具——InVEST(the integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)模型在该领域得到了有效的应用。InVEST模型的水源涵养模块是一种基于水量平衡的估算方法,根据Budyko^[1]曲线和年均降雨量,假设扣除蒸散量后集水区内产生的所有水均到达出水口,忽略地表和地下水的交互作用,提出了一个简化的汇流过程,模型栅格单元的降雨量减去实际蒸散量即为产水量,包括地表产水量、土壤含水量、冠层截留量和枯枝落叶层拦蓄量^[2-4]。产水量经土壤饱和导水率、地形因子以及流速系数的修正来得到区域水源涵养量^[5]。相对传统的产水量估算方法,该模型打破了从单一生态系统进行估算的常态,从流域角度出发,很好的将下垫面差异下的空间异质性结果表达出来,实现土地利用条件下的水源涵养功能评估。国外学者将该模型曾成功应用于美国的俄勒冈州的威拉米特河流域^[6]、西非国家加纳和科特迪瓦^[7]等地区的产水量估算。国内学者也借助该模型对生态系统的水源涵养功能评估做出许多研究。如傅斌等^[8]运用该模型研究了都江堰市水源涵养功能的空间格局;白杨等^[9]基于该模型评估了白洋淀流域包括水源涵养在内的诸多生态系统服务功能;余新晓等^[10]用InVEST模型评估了北京山区森林的水源涵养功能;陈龙等^[11]做了澜沧江流域生态系统水源涵养功能研究等等。

秦岭北麓陕西段是渭河及其众多支流的重要水源补给区和发源地^[12],对关中地区社会经济发展至关重要,是关中城市群的主要水源地。目前国内对秦岭北麓生态系统服务功能的研究为数不多,尤其对该地区生态系统水分保持的过程与能力等水文功效的研究少之又少。本文基于InVEST模型对该地区水源涵养功能分别从流域、子流域角度进行评估,不同流域间的水源涵养能力强弱,能反映地区水资源的空

间分布,有助于了解区域供水、蓄水的真实情况。而不同植被覆盖下的水源涵养量研究,有助于秦岭北麓水源涵养林的保育等等。总之,秦岭北麓水源涵养功能评估可为该地区的水资源空间规划与管理,均衡各流域的水资源分配,进一步惠及城市经济发展等提供科学参考^[13]。

1 研究区概况

秦岭山脉是地处我国中部的东西走向的巨大山脉,主体部分位于陕西省中南部,北临渭河,南面汉江。研究区秦岭北麓系指秦岭北坡陕西段,地理范围为33°42′—34°41′N,106°42′—110°26′E。南以秦岭主梁为界,北至渭河,东西皆以陕西省省界为限。包括西安、宝鸡、渭南、咸阳、华阴、商洛6地(县)级市的23个县区,总面积约1.48×10⁴ km²。秦岭北麓突出于渭河平原上,从山脊线到渭河平原宽不足40 km,峡谷深切,崖壁陡峭^[14]。属暖温带半湿润半干旱季风气候,夏热冬冷。秦岭北麓是渭河南岸黑河、石头河、灞河、涝河、沔河等众多支流的发源地。年均气温12℃,年蒸发量1 000~2 000 mm,年降水量600~800 mm,且高度增加100 m降水约增加70 mm。降水季节分布不均,夏秋两季的降水占总降水的70%以上。植被类型常见于暖温带落叶阔叶林,受地形因素影响,植被分布具有明显的垂直特征,从山麓至山顶,植被类型依次为旱作农耕植被、栓皮栎林、锐齿栎林、辽东栎林、红桦林、牛皮桦林、巴山冷杉林、太白红杉林、杜鹃灌丛^[15]。

2 研究方法与数据来源

2.1 模型算法

InVEST模型的产水量模块具体算法为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \cdot P_x \quad (1)$$

式中:Y_{xj}——栅格单元x中土地覆被类型j的年产水量(mm); AET_{xj}——栅格单元x中土地覆被类型j的实际蒸散量(mm); P_x——栅格单元x的降雨量(mm)。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

式中: R_{xj} ——Bydyko 干燥指数, 即潜在蒸散量与降水的比值; ω_x ——年所需水量与年降水量的比值。

$$\omega_x = Z \cdot \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$PAWC = 54.509 - 0.132S_{AN} - 0.003S_{AN}^2 - 0.055S_{IL} - 0.006S_{IL}^2 - 0.738C_{LA} + 0.007C_{LA}^2 - 2.688C + 0.501C^2 \quad (4)$$

$$AWC = \min(\text{soil_depth}, \text{root_depth}) \cdot PAWC \quad (5)$$

式中: PAWC——植物有效含水量; S_{AN} , S_{IL} , C_{LA} ——各类型土壤中的沙粒、粉粒、黏粒的含量值大小(%); C ——土壤有机质含量值大小(%).

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (6)$$

式中: R_{xj} ——栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数, 是不同发育时期植物蒸散量与潜在蒸散量的比值。文章结合 FAO Penman-Monteith 法等来估算参考作物蒸散系数; ET_{0x} ——栅格单元 x 的潜在蒸散量(mm/d), 具体算法为:

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.0408 \times R_a \cdot (T_{avg} + 17) \times (T_D - 0.0123P)^{0.76} \quad (7)$$

式中: R_a ——太阳大气顶层辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); T_{avg} ——日最高温均值和日最低温均值的平均值($^{\circ}C$); T_D ——日最高温均值和日最低温均值的差值($^{\circ}C$); P ——月均降水量(mm)。

式中: Z ——Zhang 系数; AWC_x ——栅格单元 x 的植物含水量(mm), 由土壤质地和土壤有效含水量决定。

$$\text{Retention} = \min\left(1, \frac{249}{\text{velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{k_{sat}}{300}\right) \times \text{yield} \quad (8)$$

式中: Retention——水源涵养量(mm); velocity——流速系数; k_{sat} ——土壤饱和导水率(mm/d), 利用 NeuroTheta 软件, 根据土壤的黏粒、粉粒含量计算得到; yield——产水量(mm); TI——地形指数, 无量纲, 由公式(9)计算得到;

$$TI = \lg\left(\frac{\text{drainage_area}}{\text{soil_depth} \times \text{percent_slope}}\right) \quad (9)$$

式中: drainage_area——集水区栅格数量, 无量纲; soil_depth——土壤深度(mm); percent_slope——百分比坡度。

2.2 数据需求与来源

资料数据来源和各参数求算方法详见表 1。

表 1 数据获取来源与参数求算

数据类型	来源与获取方法
土地利用数据 (2000, 2010 年)	数据来源于陕西省生态环境 10 a 变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目(STSN-05-26)下发数据
地形数据 (DEM、子流域数据)	以秦岭北麓 30 m 的 DEM 为基础, 利用 ArcGIS 对其进行注地填充、汇流累积量计算等一系列水文分析, 最终以子流域的形式参与模型运算
降雨数据	选择秦岭北麓及周边 20 个省内外气象站点的多年平均降雨数据(1981—2010 年)在 ArcGIS 中进行克里金插值, 最终得到降水空间栅格数据
蒸散量数据	由陕西省生态 10 a 遥感调查与评估项目的栅格数据图层得来, 具体根据 Modified-Hargreaves 法计算得到, 参与计算的数据包括大气顶层辐射、日最高温均值、日最低温均值和日均降水量(1981—2010 年)。数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)
土壤数据	土壤类型数据为联合国粮农组织构建的 1:100 万中国土壤数据集。土壤属性数据参照《陕西土壤》、《陕西省第二次土壤普查数据集》, 结合秦岭北麓的实地土壤条件, 确定研究区各类土壤的砂砾、粉粒、黏粒、有机质含量、土层厚度数据 ^[16]
植物有效含水量	根据 Zhou 等 ^[17-18] 的计算方法(公式 4—5), 按照 55 个土壤亚类的属性数据(沙粒、粉粒、黏粒及有机质含量)计算得到
根系深度	以陕西植被类型、分布及覆盖度为基础, 结合秦岭北麓的植被条件进行赋值, 26 类 3 级土地利用类型中, 植被类共 16 类分别赋值, 非植被类 10 类均赋值为 1 ^[19-21]
Zhang 系数	基于降水径流关系得到平均自然径流量, 反复校验得出。
流速系数	参照模型数据库进行赋值
地形指数	根据土壤深度、百分比坡度和汇水面积计算获得
土壤饱和导水率	用 Neuro Theta 软件, 基于实地土壤黏粒、粉粒、和砂砾百分比含量来进行预测 ^[22-23]

3 结果分析

3.1 空间格局分析

基于 InVEST 模型分别评估了 2000 与 2010 年秦岭北麓的水源涵养功能,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,2000 年与 2010 年各流域内的水源涵养能力与水源涵养量分布趋势大体一致,表现为各子流域的水源涵养能力从南向北依次呈递减趋势。黑河流域南部、石头河流域南部、神沙河流域、灞河流域东南部水源涵养能力较大,均大于 300 mm;而位于关中地区的零河流域、沔河流域北部、泾河流域北部以及渭河流域西北部水源涵养能力明显较弱,均小于 100 mm;其余地区水源涵养能力在 100~300 mm 之间。2000 年,秦岭北麓水源涵养总量为 $4.02 \times 10^9 \text{ m}^3$,黑河流域、石头河流域为主要的水源涵养区,涵养量为 $9.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $6.64 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占区域水源涵养总量的 24.26% 和 16.54%。潼河流域的水源涵养量

最低,为 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其余各流域水源涵养量居中,分别占到区域水源涵养总量的 8.85%~9.78%;2010 年,秦岭北麓水源涵养总量为 $4.45 \times 10^9 \text{ m}^3$,黑河流域水源涵养量最大,为 $1.09 \times 10^9 \text{ m}^3$,石头和流域、泾河流域、灞河流域、涝河流域、神沙河流域、沔河流域和赤水河流域次之。水源涵养量较低的为罗夫河流域、零河流域,潼河流域水源涵养量最小,为 $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

流域的产水量由径流量和水源涵养量两部分构成,文章基于 InVEST 模型首先计算了流域的产水量,而后根据土壤饱和导水率等参数对产水量进行修正得到区域的水源涵养量。选取灞河等若干典型流域,参照《陕西省水资源公报》及马新萍^[24]等的研究成果,对照流域的产水量、径流量和水源涵养量 3 个水文指标,对模型模拟的水源涵养量进行验证,显示相对误差控制在 0.09 以内,表明模型在秦岭北麓水源涵养量的模拟中计算结果较为可靠。

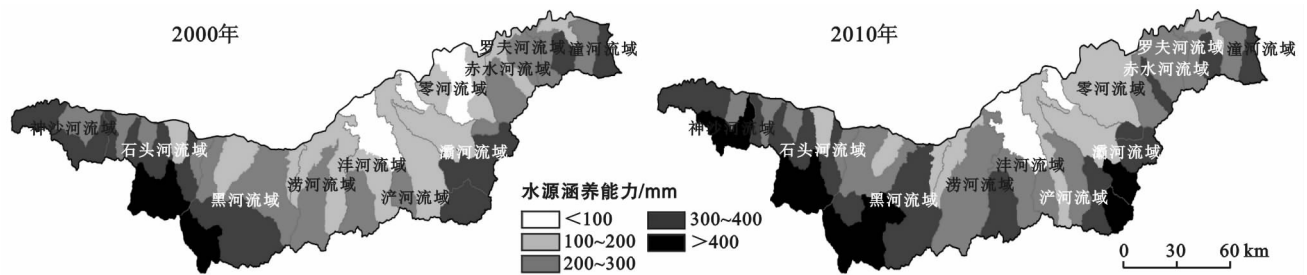


图 1 秦岭北麓 2000 年和 2010 年水源涵养能力空间分布图

图 2 展示了 2000, 2010 年研究区水源涵养功能空间分布的变化特征。由图 2 可知,2010 年较 2000 年,秦岭北麓各流域水源涵养能力增加量大于 30 mm 的是黑河流域 (34.75 mm)、神沙河流域 (31.38 mm)、涝河流域 (36.45 mm) 和赤水河流域 (38.57 mm),增加较明显的区域出现在黑河流域东部小流域和泾河流域西南部小流域;水源涵养能力增加量在 20~30 mm 的是泾河流域 (22.95 mm)、灞河流域 (28.51 mm)、沔河流域 (23.14 mm) 及零河流域 (25.11 mm);水源涵养能力增加量在 0~20 mm 的是石头河流域和罗夫河流域,增加量分别为 18.82, 2.72 mm;水源涵养能力减小的是潼河流域,减小了 9.88 mm。从水源涵养总量来看,秦岭北麓各流域大部分呈增加趋势,小流域增加量最大的出现在涝河流域,黑河流域总量增加量最大,为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$,其余各流域也呈不同程度的增加。而潼河流域水源涵养量呈减小趋势,总量减小了 $5.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。生态系统的水源涵养能力,是区域蓄水、保水能力的量化表征。黑河流域上游、石头河流域上游、整个神沙河流域以

及灞河流域上游,植被覆盖率高,植被垂直结构发育完整,山地棕壤、暗棕壤土层厚,植被强有力的拦蓄水能力和土壤稳定的持水能力共同决定了秦岭北麓南部小流域较强的水源涵养能力;黑河流域北部、石头河流域北部、涝河流域以及研究区东部的赤水河流域、罗夫河流域、潼河流域,靠近平原地区,农业活动频繁、城镇化程度较高,易产生地表径流,水源涵养能力较弱;而位于关中城市群的泾河流域下游、沔河流域下游、灞河流域下游西北部及零河流域西部,城市区受人类活动干扰强烈,自然植被保持面积小,下垫面异质性显著,水源涵养能力明显较弱。

3.2 影响因素分析

水源涵养是生态系统重要的服务功能之一。陆地生态系统的水源涵养功能在空间尺度上,能够实现地表径流、土壤持水以及地下径流的相互转换,从而起到调节区域水分循环的作用;在时间尺度上,在枯水期补充河流水量,洪水期减缓地表径流量,可以有效地防止河流、湖泊、水库的淤塞,保护可饮用水源^[25-26]。而区域的水源涵养功能受区域气候因子及

人类活动的影响(土地利用方式、植被覆盖)而有差异。主要影响因素可归为 3 类。

3.2.1 气候因子的影响 气候因子对区域水源涵养能力的影响主要用降雨量和蒸散量来表征。图 3 展示了研究区 2000, 2010 年的主要气候因子的分布情况, 包括降雨量和实际蒸散量。由图 3 可知, 研究区 2000 和 2010 年, 年降水量的空间分布与水源涵养能力的空间分布趋势一致, 山区年降雨量较城市区大, 水源涵养能力也较高。实际蒸散量指地物实际被蒸发的水分量, 是维持区域水分循环的重要因子, 秦岭

北麓南部山区海拔高, 以自然植被为主, 尽管蒸散量较大, 但降水量高, 加之植被与土壤的综合作用, 使得山区森林生态系统的水源涵养能力远大于北部平原城市生态系统。模型所选用的气象因子数据皆为多年平均值, 从两个不同年份的结果对比来看, 2010 年较 2000 年, 各地区年均降雨量有增有减, 其中位于研究区东北部的潼河流域、罗夫河流域降雨量减少趋势最为明显, 与该地区水源涵养能力的相对减弱趋势相一致。此外, 2010 年较 2000 年研究区实际蒸散量整体呈不明显减弱趋势, 与水源涵养能力增强的趋势相对应。

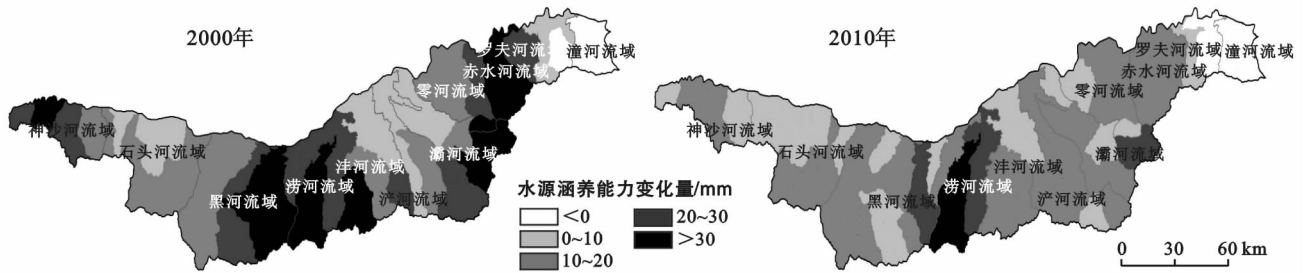


图 2 秦岭北麓 2010 年较 2000 年水源涵养功能变化量

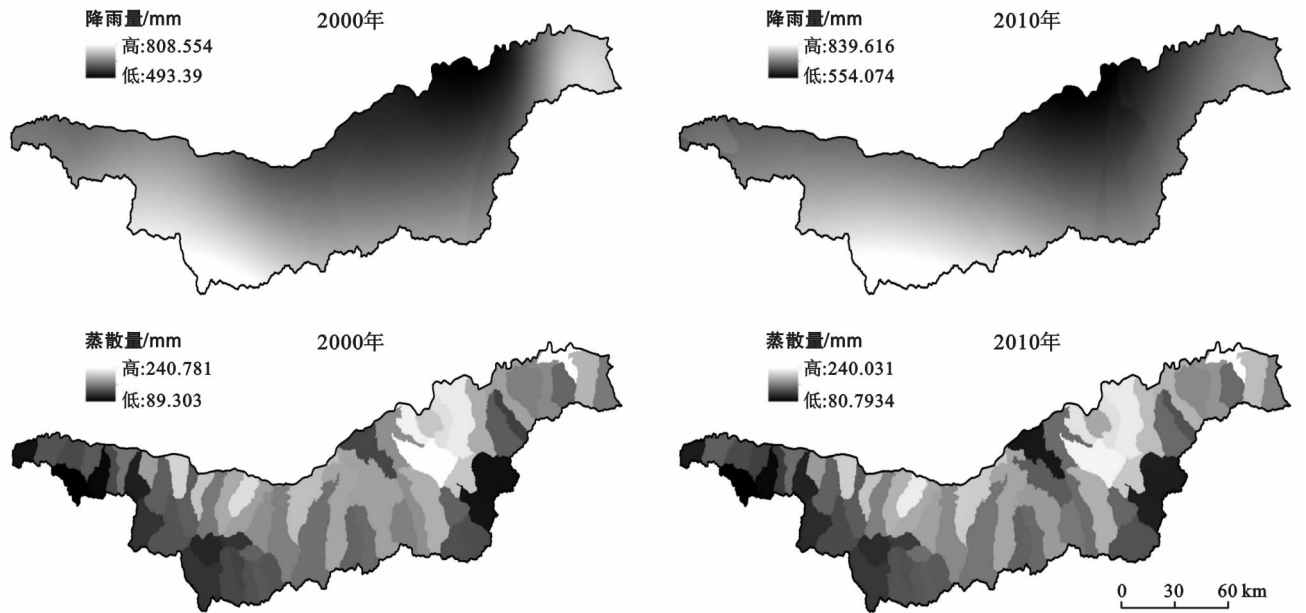


图 3 秦岭北麓 2000 年和 2010 年主要气候因子变化

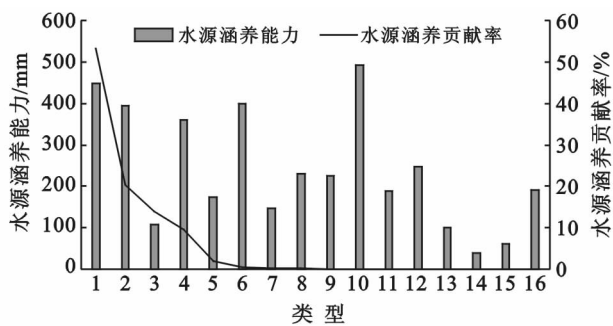
3.2.2 土地利用方式的影响 以 2010 年模型各参数和图层为基础, 将 2010 年的土地利用图改为 2000 年的图件, 得到基于 2000 年土地利用覆被下的水源涵养能力值, 2000 和 2010 年各地类的水源涵养能力详见表 2。由表 2 可以看出, 2010 年较 2000 年, 秦岭北麓各类用地水源涵养能力除城镇用地和湿地呈减少趋势外, 其余各地类均呈增加趋势。10 a 间研究区各地类面积变化最大的是农田和城镇用地, 其中, 农田面积减少 300.69 km², 而城镇用地面积增加

265.59 km², 增加的城镇用地中, 约 97% 由农田转入, 城市扩张使区域下垫面透水性降低, 10 a 间关中城市群所处区域的水源涵养能力相应的减弱, 此外, 农田和城镇建设用地之间的相互转换引发的水源涵养量的变化, 也与城市内部植被覆盖、城市集水和截留等城市水循环系统有关; 2010 年湿地面积较 2000 年减少, 因此湿地水源涵养能力呈减弱趋势; 而裸地及其余各地类的水源涵养能力均呈增加趋势, 主要是由十年间裸地面积减少, 而森林、灌丛、草地覆盖度增加所致。

表 2 秦岭北麓 2000 和 2010 年各地类水源涵养能力比较

用地类型	2000 年		2010 年	
	水源涵养能力/mm	水源涵养量/ 10^8 m^3	水源涵养能力/mm	水源涵养量/ 10^8 m^3
草地	172.33	0.86	172.77	0.90
城镇	70.26	0.67	70.11	0.88
灌丛	394.29	8.79	394.63	8.90
裸地	98.53	0.08	101.36	0.08
农田	107.01	6.47	107.65	6.15
森林	429.92	27.48	430.13	27.55
湿地	63.94	0.06	46.70	0.04

3.2.3 植被和土壤因素的影响 植被和土壤是区域水源涵养功能发挥的重要因子。前者通过林冠截留和枯枝落叶拦蓄来起到水源涵养的作用,后者通过土壤的孔隙结构特性,与植物根系、土壤生物共同实现水分的蓄积和再分配。秦岭北麓,是天然林的主要分布区,2010 年森林面积共计 $5\,825.92 \text{ km}^2$, 占总用地面积的 39.25%, 灌丛 $2\,045.37 \text{ km}^2$, 占 13.78%, 草地 481.59 km^2 , 占 3.24%。森林水源涵养能力为 430.13 mm , 灌丛为 394.13 mm , 草地为 172.77 mm 。图 4 为研究区不同植被类型下的水源涵养能力比较, 从图中可以看出稀疏灌木林、落叶阔叶林、稀疏林、落叶阔叶灌木林及针阔混交林的水源涵养能力最占优势。就水源涵养量而言, 落叶阔叶林的水源涵养贡献率最高, 占总涵养量的 53.27%; 其次为落叶阔叶灌木林, 占 20.42%。



注: 1 落叶阔叶林; 2 落叶阔叶灌木林; 3 旱地; 4 针阔混交林; 5 草丛; 6 稀疏林; 7 乔木园地; 8 常绿针叶林; 9 灌木绿地; 10 稀疏灌木林; 11 草本绿地; 12 灌木园地; 13 稀疏草地; 14 水田; 15 草本沼泽; 16 落叶针叶林。

图 4 不同植被类型下的水源涵养能力比较

秦岭北麓从渭河谷地到主脊线, 分布的土壤类型共有亚类 55 类, 土类 14 类, 各类土壤的水源涵养能力平均值为 295.33 mm , 暗棕壤的水源涵养能力最强为 511.14 mm , 沼泽土的水源涵养能力最差为 101.11 mm 。秦岭北麓分布面积较广的土壤类型主要有褐土、棕壤、粗骨土、黄绵土、新积土, 其中褐土的分布面积最大, 为 $4\,521.53 \text{ km}^2$, 占研究区总面积的 30.51%,

且主要分布在研究区北部海拔在 $1\,300 \text{ m}$ 以下的低山丘陵; 其次为棕壤 $4\,301.44 \text{ km}^2$, 占 29.03%, 主要分布在海拔 $1\,300 \sim 2\,200 \text{ m}$ 的山地上, 是暖温带落叶阔叶林或针阔混交林下形成的森林土壤。此外, 粗骨土 $1\,634.10 \text{ km}^2$, 占 11.03%, 黄绵土 $1\,609.22 \text{ km}^2$, 占 10.86%, 新积土 $1\,072.64 \text{ km}^2$, 占 7.24%。表 3 为研究区 5 类主要土壤覆盖下的水源涵养能力比较, 5 种主要土壤类型的水源涵养能力从高到低依次是粗骨土、棕壤、褐土、黄绵土和新积土。5 类主要土壤的水源涵养量占总涵养量的 90.23%, 其中, 棕壤的水源涵养贡献率最大, 为 37.67%; 其次为褐土和粗骨土, 分别为 36.37% 和 18.80%; 黄绵土和新积土的贡献率较低。

表 3 秦岭北麓 5 类主要土壤水源涵养能力比较

土类	水源涵养能力/mm	土壤有机质含量/%	土壤饱和导水率/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	水源涵养贡献率/%
粗骨土	462.51	2.08	313.26	18.80
棕壤	355.10	3.99	416.39	37.67
褐土	220.86	1.72	417.03	24.88
黄绵土	144.76	1.09	316.81	5.78
心积土	118.85	0.76	252.75	3.11

4 讨论与结论

(1) 2000 年秦岭北麓水源涵养总量共计 $4.02 \times 10^9 \text{ m}^3$, 区域平均涵养能力 242.37 mm ; 2010 年秦岭北麓水源涵养总量共计为 $4.45 \times 10^9 \text{ m}^3$, 区域平均涵养能力 265.33 mm , 2010 年较 2000 年, 水源涵养量增加 $4.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。秦岭北麓水源涵养能力表现为越靠近秦岭主脊水源涵养能力越强。水源涵养能力的高值区集中在黑河南部、石头河南部、灞河和泾河流域上游小流域。

(2) 区域的水源涵养能力受气候、土地利用方式、植被覆盖及土壤条件等因子的影响而产生差异。研究区西南部和东南部均为秦岭山区, 山区森林生态系统年均降雨量大, 植被覆盖率高, 水源涵养能力强; 北部平原城市生态系统, 降水量较少, 下垫面不透水层分布广泛, 产水量多以径流形式流失, 涵养能力较弱。其次, 研究区 10 a 间的土地利用变化主要通过植被覆盖来影响水源涵养能力, 从不同植被类型比较来看, 落叶阔叶林的水源涵养贡献率最高。再者, 秦岭北麓从渭河谷地到主脊线, 土壤类型有明显差异, 南部山区广阔分布的棕壤、暗棕壤占研究区总面积的 31.5%, 棕壤、暗棕壤土层厚, 水土保持能力强, 水源涵养贡献率相对较高。

(3) 近年来,随着“海绵城市”概念的提出,城市的发展要求城市必须在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的弹性,下雨时吸水、蓄水、渗水、净化,雨后及时将蓄存的水释放并加以利用。对秦岭北麓而言,关中城市群区域水源涵养能力明显较其他区域小,城市发展对下垫面原始结构的人工改造,使得城市区产流量大,径流量也大,城市雨洪排水负荷与内涝风险也随之加剧。因此,关中城市区的发展应合理配置土地利用与覆被的方式方法,通过减少对林地、农田的侵占、增加城市绿化、减少不透水层面积等生态手段来调节城市水循环系统,减少对渭河的冲击。同时,从小流域入手对区域水资源进行调控,平衡城市的水源供给和用水需求。总之,城市的扩展应将水源涵养等水文因素考虑在内,对水资源进行合理的规划和管理,确定合适的城市规模和发展速度。

[参 考 文 献]

- [1] 李斌,李丽娟,覃馥楚,等. 基于 Budyko 假设评估洮儿河流域中上游气候变化的径流影响[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 70-76.
- [2] 葛菁,吴楠,何方. 等. 新安江上游生态系统产水服务及价值[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2): 90-96.
- [3] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189.
- [4] 王纪伟,刘康,瓮耐义. 基于 InVEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 213-217.
- [5] 包玉斌,李婷,柳辉,等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676.
- [6] Nelson E, Mendoza G, Regetz J. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [7] Mansoor D K, Leha, M D, Matlock E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165(1751): 6-18.
- [8] 傅斌,徐佩,王玉宽,等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [9] 白杨,郑华,庄长伟,等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 0711-0717.
- [10] 余新晓,周彬,吕锡芝,等. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [11] Chen Long, Xie Gaodi, Zhang Changshu, et al. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River Basin [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 322-327.
- [12] 陆斌,张胜利,晋建霞. 秦岭北坡水源林区不同类型林分土壤水文特性[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 176-180.
- [13] 李屹峰,欧阳志云,郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [14] 刘康,马乃喜,胥艳玲,等. 秦岭山地生态环境保护与建设[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 157-160.
- [15] 白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [16] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [17] Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3-12.
- [18] 周文佐,刘高焕,潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究: 以东北黑土为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 89-95.
- [19] 雷明德. 陕西植被[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] Milan K. Distribution of root biomass and length in *Picea abies* ecosystem under different immission regions [J]. *Plant and Soil*, 1994, 167(2): 173-179.
- [21] Fan Jianling, Brian McConkey, Wang Hong. et. al. Root distribution by temperate agricultural crops [J]. *Field Crops Research*, 2016, 189(2016): 68-74.
- [22] 杨亚辉,赵文慧,木热提江·阿不拉. 等. 不同植被对土壤理化性质影响: 以王东沟小流域为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 249-252.
- [23] Minasny B, Mcbratney A B. Neuro Theta, pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties for Australia soil [EB/OL]. Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2003. <http://www.Usyd.edu.au/su/agric/ae/aepa>.
- [24] 马新萍,白红英,侯钦磊,等. 1959—2010 年秦岭灞河流域径流量变化及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1298-1305.
- [25] 齐静,袁兴中,刘红. 等. 重庆市三峡库区水源涵养重要功能区生态系统服务功能时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 256-266.
- [26] 张媛媛. 1980—2005 年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.