

基于 InVEST 模型的横断山区产水量模拟

窦苗^{1,2,3,4}, 孙建国^{1,2}, 陈海鹏^{1,2,3,4}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省地理国情检测工程实验室, 甘肃兰州 730070; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要 [目的]掌握横断山区产水量及水源分布空间。[方法]利用 InVEST 模型评估计算 2005—2014 年横断山区年均产水量, 分析产水量的空间分布特征及其原因。[结果]横断山区年均产水量为 1 723.3 亿 m³, 与自然径流量较为接近; 产水量的空间分布总体呈现出自西北向东南递增的趋势; 年均产水量及其空间分布特征与研究区土地利用/覆被类型、土壤深度、地势等因素存在密切关系。[结论]该研究可为横断山区水文过程进一步研究提供基础资料, 同时为区域水资源管理提供科学依据。

关键词 产水量; InVEST 模型; 横断山区; 流域; 土地利用/覆被

中图分类号 P333.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)21-0054-05

Water Production Simulation in Hengduan Mountainous Region Based on InVEST Model

DOU Miao^{1,2,3,4}, SUN Jian-guo^{1,2}, CHEN Hai-peng^{1,2,3,4} (1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070; 2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou, Gansu 730070; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract [Objective] To master water production and water distribution in Hengduan Mountains. [Method] Using InVEST model, the average annual water yield of Hengduan Mountains between 2005-2014 was evaluated and analyzed, and the spatial distribution characteristics of water production and their causes were analyzed. [Result] The results showed that the annual average water yield was 172.33 billion m³, which was relatively close to natural runoff. The spatial distribution of water yield showed a trend of increase from northwest to southeast in general. The annual average water yield and its spatial distribution was closely related to land use/cover type, soil depth, topography and so on. [Conclusion] The study can provide basic data for further study of hydrological processes in Hengduan Mountains, and provide scientific basis for regional water resources management.

Key words Water yield; InVEST model; Hengduan Mountainous Region; Watershed; Land use/cover

生态系统服务是人类赖以生存和发展的资源与环境基础, 随着社会的发展, 人类与自然生态系统结构与功能的联系日益紧密, 生态系统服务研究已经成为国际生态学和相关学科研究的前沿与热点^[1]。2001—2015 年实施的联合国千年生态系统评估(MA)将生态系统服务分为供给、调节、文化和支持服务 4 类^[2]。水源供给作为重要的供给服务, 受人类活动影响较大, 是生态系统服务评估的重要方面^[3-6]。水资源的分布直接决定了人口、土地利用类型等区域布局, 也会对地区经济社会的发展产生极其重要的影响。因此, 研究区域产水量与水资源的分布, 对合理开发和利用水资源具有重要意义^[7]。

产水是一个复杂的过程, 它与降水、蒸发、土壤渗透和植被蒸腾等因素密切相关, 而其中生态水文模型模拟是解决大尺度产水量评估的重要手段, 并广泛应用于区域水循环研究与水资源管理中。目前常用的产水量评估模型主要有 MIKE SHE 模型^[8]、TOPMODEL 模型^[9]和 SWAT 模型^[10]等。2010 年, 由斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界自然基金会合作联合开发的模型——InVEST(the integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)模型^[11]被引入我国, 取得了良好的模拟效果。潘韬等^[12]利用 InVEST 模型在我国三江源区评估了生态系统水源供给服务的时空变化, 结果显示, 三江源区水源供给量的时空变化是气候变化和土地利用

共同作用的结果; 张灿强等^[13]在西苕溪流域利用 InVEST 模型进行了产水量分析, 得到了小流域的产水量与空间分布; 余新晓等^[14]基于 InVEST 模型对北京山区的森林水源涵养功能进行评估, 为定量评价和客观认识北京山区不同森林类型的水源涵养功能提供参考; Chen 等^[15]利用 InVEST 模型对澜沧江流域的水源涵养功能进行了研究, 模拟出流域水源涵养能力的时空变化分布, 为澜沧江流域水资源的有效管理提供了科学依据。

横断山区由南向北跨越亚热带、高原温带和高原亚寒带, 岭谷相间排列, 并处于西南和东南两种季风影响的范围内, 气候差异很大, 降水和径流的分布也各不相同。区域内水量丰富, 河道坡陡, 落差集中, 水能资源丰富^[16]。从水文站记录的数据发现, 近年来横断山区河川径流量有所变化。有学者认为, 生态系统产水能力的变化可能是导致径流量改变的主要因素^[17]。然而, 目前关于横断山区生态系统的水源供给服务研究鲜见报道。笔者基于 InVEST 模型产水量模块计算分析了 2005—2014 年横断山区的年均产水量以及生态系统水源供给服务的空间分布特征及其原因, 旨在为区域的健康发展、水资源区划保护和合理开发提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况 横断山区位于 96°~105° E, 24°~35° N, 面积 60 余万 km²。区北与西北山地相接, 东邻四川盆地, 南连云南高原。在行政区划上, 包括四川、云南、西藏、青海、甘肃 5 省所辖地州市的全部或部分。地势北高南低、西高东低, 总地势自西北向东南倾斜(图 1)。山地海拔 4 000 ~

4 500 m,以大雪山主峰贡嘎山海拔最高,达 7 000 m。其间的河流有怒江、澜沧江、金沙江、雅砻江、大渡河和岷江等。此外,该区还包括黄河上游河段,西南部有伊洛瓦底江支流大盈江和龙川江。除黄河、岷江、大渡河、雅砻江及一些小支流源出该区外,金沙江、澜沧江和怒江都发源于青藏高原腹地^[16]。区内具有多种土壤类型、丰富的生物资源,气候特征独特,主要表现为干湿季节分明和垂直差异显著。

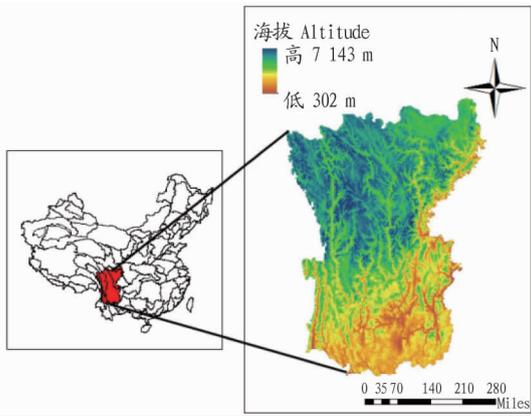


图1 横断山区地理位置

Fig. 1 Location of Hengduan Mountainous Region

1.2 研究方法

1.2.1 InVEST 模型。InVEST 模型能够进行多种生态系统服务功能的评估,其可以分为两大模块,即水模块和非水模块,水模块包括水源涵养、产水量、土壤保持、土壤侵蚀等;非水模块包括碳储量、生物多样性、木材生产、授粉等。笔者基于 ArcGIS 10.2 软件,利用 InVEST 模型产水量模块对横断山区进行产水量评估。

InVEST 模型的产水量模块通过估计不同区域水资源的相对贡献,从而了解土地利用格局的变化对年地表产水量的影响。其原理是基于水量平衡方程,计算生态系统产水量(即水源供给量),各栅格的降水量减去实际蒸散发后的水量即得该栅格产水量^[18],包括地表产流、枯落物持水量、土壤含水量和冠层截留量^[19]。

模型主要计算公式如下:

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

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

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

$$R_{xj} = \frac{K_{xj} \cdot ETO_x}{P_x} \quad (4)$$

式(1)(2)(3)(4)中, Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量; AET_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的实际蒸散; P_x 为栅格单元 x 的降水量; ω_x 为改进的、无量纲的植被可利用水量与年预期降水量; R_{xj} 为干燥指数; Z 为 Zhang 系数(季节常数,与降雨季节分布有关的位于 1~30 的浮点型数据); AWC_x 为栅格单元 x 的土壤有效含水量,由土壤深度和理化

性质决定; K_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的植被蒸散系数; ETO_x 为参考作物蒸散。

1.2.2 数据处理。利用 InVEST 模型进行产水量评估需要的输入数据包括土地利用/覆被图、年平均降水量图、年平均潜在蒸散量图、土壤深度图、植物可利用水含量(PAWC)、流域图与子流域图以及一个包含各土地利用/覆被生物物理系数的生物物理参数表。

1.2.2.1 土地利用/覆被。土地利用/覆被由 TM 遥感影像分类得到,数据来源于地球系统科学数据共享平台。根据数据分析要求将土地利用/覆盖类型分为水田、旱地、有林地、灌木林、疏林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、沙地、沼泽地、裸土地和裸岩石砾地等。

1.2.2.2 年均降水量。该研究所使用的降水量数据均来自于中国气象科学数据共享服务网,包括 2005—2014 年横断山区 62 个站点(涉及四川、云南、西藏、青海、甘肃 5 个省份)的年均降水量。根据模型要求,在 ArcGIS 中采用克里金插值法对站点数据进行空间插值,得到年均降水量图(图 2a)。

1.2.2.3 年均潜在蒸散量。计算潜在蒸散量所需要的数据包括降水量数据、日温数据和太阳辐射数据,均来自中国气象科学数据共享服务网。估算潜在蒸散量的方法主要有 Penman - Monteith (PM)、Hargreaves (HG)、Modified - Hargreaves 法等^[20]。其中 Penman - Monteith 公式是受到普遍认可的潜在蒸散计算方法,但由于其要求参数较多,受到数据限制。查阅相关文献得知在 InVEST 模型中利用 Modified - Hargreaves 法计算潜在蒸散量较为普遍,因此该研究选用该方法进行潜在蒸散量的计算,得到年均潜在蒸散量图(图 2b)。计算公式如下:

$$ET_0 = 0.0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{avg} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (5)$$

式(5)中, ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); RA 为太阳大气顶层辐射[MJ/(m²·d)],可利用气象站太阳总辐射数据计算获得; T_{avg} 是日最高温均值和日最低温均值的平均值(°C); TD 是日最高温均值和日最低温均值的差值(°C); P 为月平均降雨量(mm)。

1.2.2.4 土壤深度。土壤深度又称根系限制层深度,是指受物理或化学特性的影响而强烈阻碍根系穿透时的土壤深度。该研究中土壤深度数据根据中国科学院地理研究所提供的第二次全国土壤调查数据进行空间插值后获得。

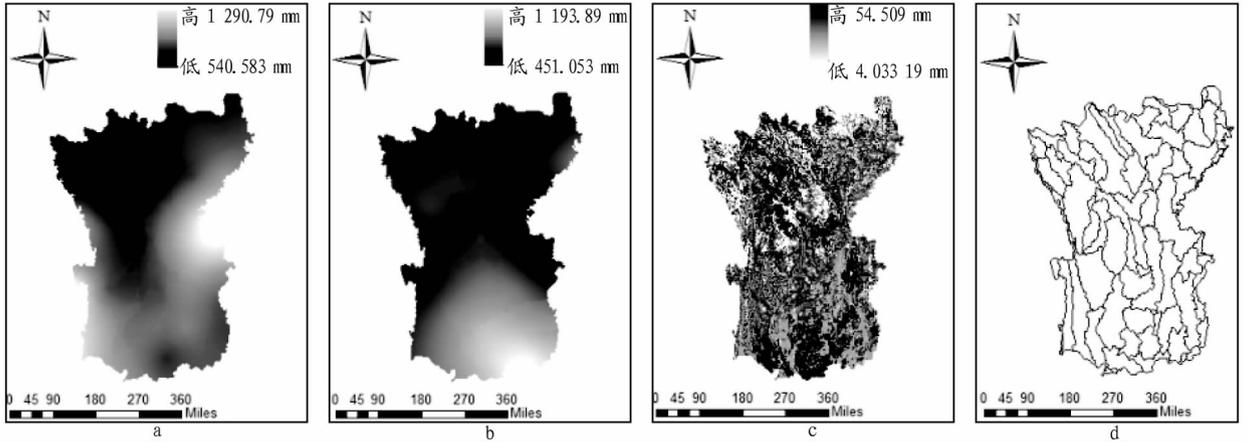
1.2.2.5 植物可利用水含量(PAWC)。PAWC 为田间持水量和永久萎蔫系数两者之间的差值。结合中国 1:100 万土壤图与世界土壤数据库中土壤质地的分类,将粉粒、砂粒、黏粒、有机质等质量分数导入土壤有效水量经验公式,提取得到植物可利用水含量图^[21](图 2c)。公式如下:

$$AWC = 54.509 - 0.132 \times SAN - 0.003 \times (SAN)^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times (SIL)^2 - 0.738 \times CLA + 0.007 \times (CLA)^2 - 2.668 \times C + 0.501 + (C)^2 \quad (6)$$

式(6)中,SAN,SIL,CLA,C 分别为砂粒、粉粒、黏粒和有机质的含量(%)。

1.2.2.6 流域划分。流域与子流域数据基于 DEM 数据,利

用 ArcGIS 水文分析工具箱进行流域划分,但是由于 DEM 数据的精度等问题,难以得到完整的流域,因此该研究借助 Arc Hydro Tools 实现。全区共划分 75 个子流域(图 2d)。



注:a. 年均降水量;b. 年均潜在蒸散量;c. 植物可利用水含量;d. 流域划分

Note: a. Average annual precipitation, b. Average annual potential evapotranspiration, c. Plant available water content, d. Watershed classification

图 2 InVEST 模型产水量评估

Fig.2 Water production evaluation of InVEST model

1.2.2.7 生物物理参数。生物物理参数资料反映土地利用/覆盖类型的属性,包括土地利用/覆盖编码、作物根系深度、蒸散系数。作物根系深度数据根据 Canadell 等对全球范围内植被最大根深的研究获得。蒸散系数则根据联合国粮农组织作物蒸散系数指南、InVEST 用户指南获得。生物物理参数见表 1。

总量相等的区域,降水次数越多,Zhang 系数越大^[12]。调节 Zhang 系数,基于研究区内水文站点的年径流量实测数据,对产水量模块的输出结果进行校验。通过查阅相关文献及对产水量模块的反复调试,发现当 Zhang 系数取值为 15 时,模型的评估结果与实测结果一致,各子流域年均产水量模拟值的相对误差较小。

表 1 生物物理参数

Table 1 Biophysical parameters

序号 No.	土地利用/覆盖类型 Land use/cover type	根系深度 Root depth mm	蒸散系数 Transpiration coefficient
1	水田	700	0.800
2	旱地	100	0.200
3	有林地	7 000	0.800
4	灌木林	5 000	0.398
5	疏林地	5 000	1.000
6	其他林地	2 500	1.000
7	高覆盖草地	2 500	0.650
8	中覆盖草地	2 500	0.650
9	低覆盖草地	2 500	0.650
10	河渠	500	1.000
11	湖泊	1 000	0.900
12	水库坑塘	1 000	1.000
13	永久性冰川雪地	10	0.800
14	滩地	1 000	0.700
15	城镇用地	500	0.300
16	农村居民点	500	0.400
17	其他建设用地	500	0.300
18	沙地	10	0.500
19	沼泽地	10	0.300
20	裸土地	10	0.500
21	裸岩石砾地	10	0.300

2 结果与分析

2.1 模拟结果 根据 InVEST 模型模拟出 2005—2014 年横断山区年均产水量空间分布情况(图 3)。

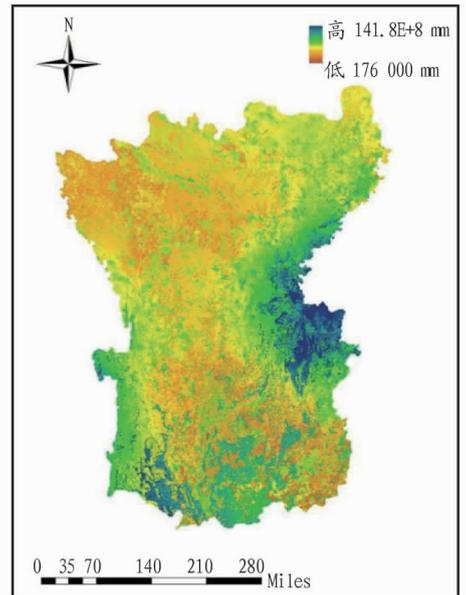


图 3 2005—2014 年横断山区年均产水量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average annual water production in Hengduan Mountainous Region during 2005 -2014

根据流域将横断山区划分为东部、西部、南部和北部 4

1.2.3 模型校准。Zhang 系数是表征降水特征的常数,对于

个区域。根据 InVEST 模型模拟计算结果,统计不同区域年均产水量结果(图4)。由图4可知,数量上,全区总产水量为 1 723.3 亿 m^3 ,东部地区年均产水量为 765 亿 m^3 ,西部地区为 105.4 亿 m^3 ,南部地区为 732.9 亿 m^3 ,北部地区为 120.0 亿 m^3 。结合图3可知,最高值位于东部地区,达 141.8 亿 m^3 ,最低值位于西北地区,仅为 17.6 亿 m^3 。空间上,东部地区及南部地区产水量较大,西北地区产水量相对较小。高值区位于四川省东部及云南省西南部,主要包括部分长江流域岷江水系与金沙江水系;低值区位于四川省西北部,区内包含部分澜沧江水系与金沙江水系,造成产水量的差异可能与研究区的地势、土地利用/覆被类型、土壤深度等因素有关。整体分布上,横断山区产水量的空间分布较为不平衡,且呈现出自东南向西北递减的趋势。

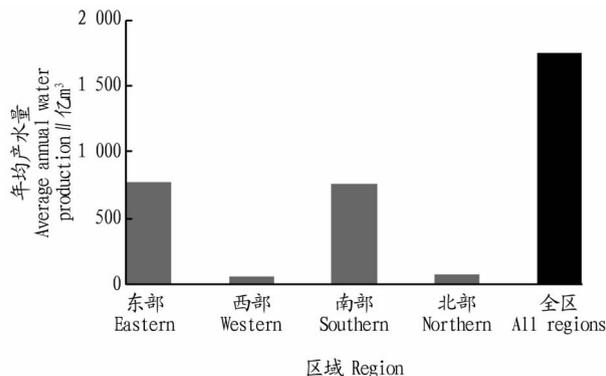


图4 横断山区不同区域的年均产水量

Fig.4 Annual water production in different regions of Hengduan Mountainous Region

2.2 产水量与各因子的关系

2.2.1 产水量与地势的关系。由图3可知,横断山区产水量呈现出自东南向西北递减的趋势。原因可能是高海拔的西北地区主要位于四川省西北部,区内分布有部分澜沧江水系与金沙江水系,水源较为充沛,但是该区属于高原高寒气候区,海拔高差大,气候立体变化明显,河谷干暖,水热不足且日照充足,因此产水量较小。低海拔东部地区及西南地区主要位于四川省东部及云南省西南部,分布有部分长江流域——岷江水系与金沙江水系。四川省东部地形为盆地,区内云多雾重日照少,降水量充沛且蒸散发量小;云南省西南部为高山深谷区,受到孟加拉湾暖湿气流的影响,北移过程中易形成降水且山高谷深不易蒸散发,故低海拔区产水量较大。

该研究根据 InVEST 模型模拟计算所得的年均产水量结果,结合横断山区地势情况,统计不同海拔的年均产水量,结果见图5。从图5可见,横断山区的产水量和海拔存在着密切联系,随着海拔的升高,产水量逐渐减少。

2.2.2 产水量与土地利用/覆被的关系。从图6可以看出,西北地区土地利用/覆被类型多为草地、有林地等,而东部地区多为灌木林、河渠等,西南地区主要土地利用/覆被类型为河渠、湖泊等。年均产水量空间分布(图3)则呈现出自东南向西北递减的趋势。

比较各土地利用/覆被类型可以得出,草地、有林地损耗

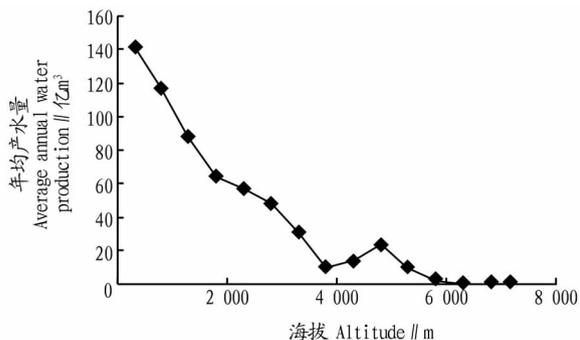


图5 不同海拔的年均产水量

Fig.5 The average annual water production at different altitude

水量较高,而灌木林、河渠、湖泊对于水量的损耗较低,故而集中分布水量损耗较高的土地利用/覆被类型的西北地区产水量较小,集中分布水量损耗较低的土地利用/覆被类型的东部地区与西南地区产水量较高。

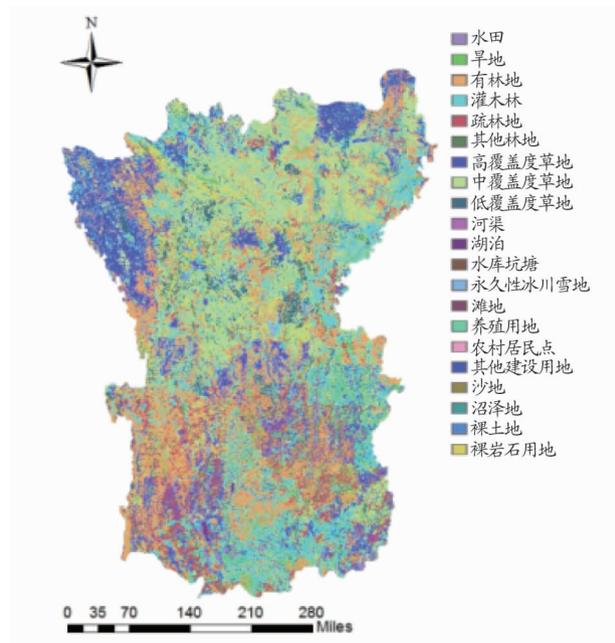


图6 横断山区土地利用/覆被

Fig.6 Land use and land cover in Hengduan Mountainous Region

2.2.3 产水量与土壤深度的关系。从图7可以看出,横断山区的土壤深度自西北向东南逐渐减小,年均产水量则呈现出自东南向西北递减的空间格局(图3)。在栅格尺度,统计 InVEST 模型模拟计算所得的年均产水量与土壤深度的关系(图8)可知,土壤深度越大产水量越低,土壤深度越小产水量越高。

3 结论与讨论

水源供给的评估对区域可持续发展和自然环境保护具有重要意义。该研究利用 InVEST 模型中的产水量模块研究横断山区水资源,基于土地利用/覆被、年均降雨量和潜在蒸散量、土壤深度、植物可利用水含量、流域与子流域信息、生物物理参数量化了横断山区的产水量,模拟出年均产水量空间分布图,并进一步评估与分析区域的水资源状况。结果表明:①横断山区年均产水量为 1 723.3 亿 m^3 ,评估结果与自

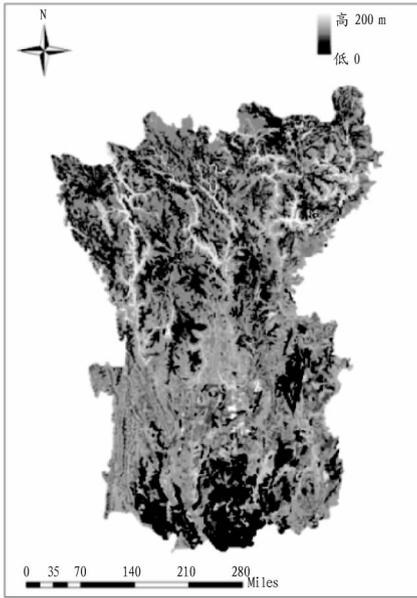


图7 横断山区土壤深度空间格局

fig.7 Spatial pattern of soil depth in Hengduan Mountainous Region

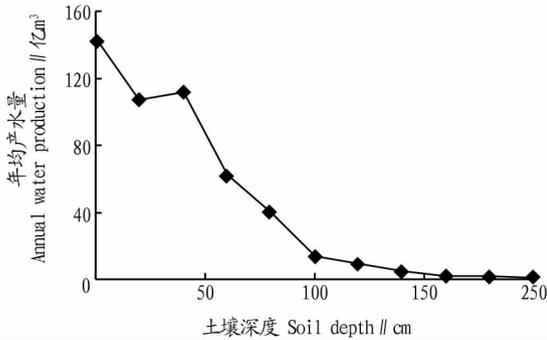


图8 横断山区不同土壤深度的年均产水量

Fig.8 The average annual water production in different soil depth of Hengduan Mountainous Region

然径流量较为接近。②横断山区水资源丰富,但空间分布不均匀,东部和西南部产水量大,最高可达 141.8 亿 m^3 ,西北地区产水量相对较小,最低值仅为 17.6 万 m^3 。③横断山区的地势、土地利用/覆被、土壤深度对产水量的高低都存在一定影响。具体表现为地势越高,产水量越低;西北部区域多分布水量损耗较高的土地利用/覆被类型,故产水量较小,东部和西南部地区则分布水量损耗较低的土地利用/覆被类型,产水量较高;土壤深度越大,产水量越低。随着区域的快速发展,陆地生态系统格局正在发生着显著变化,研究分析区域水资源的空间分布与产水量,可以为合理开发和利用水资源

提供科学依据。InVEST 模型为区域产水量的评估提供了合理的模拟工具,但该方法仍存在一些缺陷。如模型运行中随机性太大,对于包含多个流域的较大区域进行产水量评估,结果存在一定误差。但总体来说,其评估结果优于其他相关模型。

参考文献

- [1] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J]. 地球科学进展,2009,24(6):571-576.
- [2] 李双成,刘金龙,张才玉,等. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J]. 地理学报,2011,66(12):1618-1630.
- [3] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature,1997,387:253-260.
- [4] DENG K M, SHI P L, XIE G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits[J]. Resources science, 2002,24(6):68-73.
- [5] XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of natural resources,2003,18(2):189-196.
- [6] LI S M, XIE G D, ZHANG C X, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. Journal of natural resources,2010,25(4):585-593.
- [7] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. 不同土地利用/覆盖类型下海南岛产水量空间分布模拟[J]. 水资源保护,2014,30(3):9-13.
- [8] 王盛萍,张志强,SUN G,等. 基于 MIKESHE 模型的潮河流域土地利用与降水变化对水文的影响评价[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(3):320-325.
- [9] 王润,刘洪斌,王伟. TOPMODEL 模型研究进展与热点[J]. 水土保持研究,2005,12(1):47-48.
- [10] 丁晋利,郑粉莉. SWAT 模型及其应用[J]. 水土保持研究,2004,11(4):128-130.
- [11] KAREIVA P, TALLIS H, RICKETTSTH, et al. Natural capital: theory and practice of mapping ecosystem services[M]. New York: Oxford University Press,2011.
- [12] 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.
- [13] 张灿强,李文华,张彪,等. 基于 InVEST 模型的西苕溪流域产水量分析[J]. 资源与生态学报:英文版,2012,3(1):50-54.
- [14] 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.
- [15] CHEN L, XIE G D, ZHANG C S, et al. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River basin[J]. Journal of resources and ecology,2011,2(4):322-327.
- [16] 熊台,李秀云,王玉枝,等. 横断山区水文区划[J]. 山地研究,1989,7(1):29-37.
- [17] WANG G X, LI N, HU H C. Hydrologic effect of ecosystem responses to climatic change in the source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. Advances in climate change research,2009,5(4):202-208.
- [18] 李仁强,黄从红,张文娟,等. 林业生态系统服务功能评估手册[M]. 北京:北京林业大学,2014.
- [19] TALLIS H T, RICKETTSTH, GUERRY A D, et al. InVEST 2.1 Beta User's Guide[M]. Stanford: The Natural Capital Project,2011.
- [20] ZHANG C Q, LI W H, ZHANG B, et al. Water yield of Xitiaoxi River basin based on InVEST modeling [J]. Journal of resources and ecology, 2012, 3(1):50-54.
- [21] ZHOU W Z, LIU G H, PAN J J, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of geographical sciences,2005,15(1):3-12.

(上接第 27 页)

- [8] 史振声,张飞. 高秆稀植大穗型玉米的密植潜力研究[J]. 玉米科学,2009,17(2):116-119.
- [9] 何代元,吴广成,刘强,等. 玉米主要农艺性状的相关通径分析[J]. 玉米科学,2003,11(4):58-60.
- [10] 张秀卿,布建中. 玉米杂交种的主要性状与产量的相关分析[J]. 山西农业大学学报,2006,5(5):95-97.
- [11] 刘玉旭,王黎明,刘必善,等. 西南地区玉米杂交种主要生物性状分析

- [J]. 玉米科学,2003,11(3):42-44.
- [12] 姜艳喜,王振华,金益,等. 玉米收获期子粒含水量相关性状的遗传及育种策略[J]. 玉米科学,2004,12(1):21-25.
- [13] 李玉华,郑如明,冯草章,等. 51 个玉米杂交种比较试验[J]. 甘肃农业大学学报,2002,37(3):323-328.
- [14] 王有芳,李少勇,王凌汉,等. 玉米果穗性状的相关和通径分析[J]. 山东农业科学,2003(3):30-31.