

基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区 水源涵养功能评估

王 耕, 韩冬雪

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: [目的] 对流域生态系统产水功能进行定量评估及空间表达, 为流域水资源优化配置, 水资源可持续管理及提高生态效率提供科学支撑。[方法] 以 2015 年大凌河上游汇水区作为研究区, 基于权衡多重生态系统服务、保护与发展的决策支持系统模型(InVEST 模型)中的水源涵养模块(Water Yield), 对大凌河上游汇水区水源涵养功能定量评价, 分析其空间分布特征, 对水源涵养量进行归一化处理, 识别其水源涵养等级。[结果] ①2015 年大凌河上游地区水源涵养总量达 $1.82 \times 10^9 \text{ m}^3$, 水源涵养量空间异质性明显。②归一化处理结果表明, 水源涵养较高等级区位于喀喇沁左翼蒙古族自治县中部、北部, 水源涵养较低等级区位于内蒙古宁城县及敖汉旗北部、河北省平泉县。水源涵养中等级面积广泛, 占据研究区面积的 34.7%。③喀喇沁左翼蒙古族自治县、朝阳县西南部为重要水源涵养区, 应加强水源管理与保护。[结论] 土地利用类型、气候因子、土壤质地等因素对水源涵养空间异质性有重要影响, 水源涵养量空间分布不均且差异显著。

关键词: InVEST 模型; 大凌河; 水源涵养; 重要性分区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)03-0206-06

中图分类号: X171.4

文献参数: 王耕, 韩冬雪. 基于 InVEST 模型的大凌河上游汇水区水源涵养功能评估[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 206-211. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.033. Wang Geng, Han Dongxue. Evaluation of water conservation function in Daling River catchment based on InVEST model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 206-211.

Evaluation of Water Conservation Function in Daling River Catchment Based on InVEST Model

WANG Geng, HAN Dongxue

(School of Urban and Environment Sciences, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: [Objective] To evaluate water production function quantitatively and study its spatial expression of watershed ecosystem in order to provide scientific support for optimal allocation and sustainable management of water resources and improvement of ecological efficiency. [Methods] Taking the upstream catchment of Daling River as the study area, we firstly evaluated the water conservation service in 2015, and analyzed the spatial distribution characteristics using the water yield module of integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model. Then, the obtained water conservation evaluation results were normalized and divided into different classes. [Results] ① Total water conservation capacity of the upstream catchment in Daling River reached to $1.82 \times 10^9 \text{ m}^3$ in 2015, and it showed obvious spatial heterogeneity. ② The normalized results showed that high grade area of water conservation was located in the central and northern part of the Kalaqin Left Wing Mongol Autonomous County, while low grade area of water conservation was located in the northern part of Aohan and Ningcheng County of Inner Mongolia and Pingquan County of Heibei City. Moderate grade area of water conservation was widely distributed, which accounted for 34.7% of the study area. ③ The Kalaqin Left Wing Mongol Autonomous County and the southwest part of Chaoyang City was important water conservation area, which should be strictly managed and protected. [Conclusion] Factors

收稿日期: 2017-12-05

修回日期: 2017-12-28

资助项目: 教育部共建人文社会科学重点研究基地项目“人海关系视角下生态安全动态仿真与政策调控”(15JJD790039)

第一作者: 王耕(1973—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 博士, 教授, 主要从事区域生态安全与管理研究。E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn.

such as land use type, climate and soil texture have important influences on the heterogeneity of water conservation, the spatial distribution of water conservation is uneven and the difference is significant.

Keywords: InVEST model; Daling River; water conservation; importance zoning

生态系统服务是指生态系统为维持人类生存与发展所提供必不可少的环境条件与效用^[1],是人类直接或间接从生态系统得到的所有收益^[2]。生态系统服务具有多样性,千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment, MA)将其分为调节服务、供给服务、支持服务、文化服务,它既为人类生存与发展提供基础保障,也能维持与协调自然生态系统结构、生态过程与区域生态环境^[3]。水源涵养作为生态系统调节服务中重要一项,近年来备受学者关注。

InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型由美国斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会共同开发,可将生态系统服务功能定量化、价值化,并以地图的形式表现出来,输出结果的空间化表达使生态系统服务的重要区域易于识别^[4]。国外学者对 InVEST 模型的研究比较成熟,该模型在美国加利福尼亚州、夏威夷群岛、拉丁美洲的亚马逊流域和非洲坦桑尼亚等地区研究中应用,水源涵养模块被 Mansoor 等^[5],Neson 等^[6]应用于西非加纳和科特迪瓦、美国俄勒冈州的威拉米特河流域,进行生态系统服务功能评估。近年来 InVEST 模型在国内广泛发展,起初研究多以 InVEST 模型的研究进展与原理为主^[7-9],现阶段延伸到水土保持模块^[10]、碳储量模块^[11]及水源涵养模块。陈骏宇等^[12]、潘韬等^[13]、张雪峰等^[14]分别对太湖流域、三江源区、内蒙古锡林河流域水源涵养功能及空间分布特征进行评估,Zhang 等^[15]将 InVEST 模型应用于西苕溪小流域地区,分析其产水量功能。InVEST 模型可将生态系统服务功能的价值量空间化,不仅为学者研究提供便利,而且为决策者制定决策方针提供科学依据。

十九大报告提出,加快生态文明体制改革,建设美丽中国。近年来中国生态建设成效较为显著,生态系统防风固沙、调蓄洪水等功能不断增强,但众多环境问题依旧存在,如水土流失、沙漠化等。大凌河流域作为辽河重要水源区、辽西地区最大河流,在调蓄洪水、增补地下水、提供城市用水方面作用显著。该区生态环境脆弱,生态环境恶劣,水土流失问题显著。本文拟以大凌河流域上游汇水区为研究区,评估其水源涵养功能及空间异质性,以期为大凌河流域水源管理、制定决策提供依据。

1 研究区概况

大凌河流域位于 118°50′—121°20′E, 40°24′—

42°20′N。发源于辽宁省凌源县打鹿沟,流经朝阳、义县后于锦县东南注入渤海。地处内蒙古黄土高原与松辽平原结合处,属于土石低山丘陵区。跨辽宁、内蒙古、河北 3 省,主要支流有老虎山河、牯牛河、西河等。全长 397.4 km,流域面积 $2.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本研究区为大凌河上游汇水区,面积为 $9\,330.59 \text{ km}^2$ 。研究区属北温带半湿润、半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量介于 450~580 mm,暴雨集中,洪涝灾害较为频繁,流域内水土流失严重,河流含沙量大。2016 年大凌河流域地表水资源为 $6.06 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水资源为 $5.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。大凌河流域在蓄水调洪、水源供给、城市工业用水中起到关键作用。

2 InVEST 模型水源涵养模块

2.1 水源涵养模块原理

InVEST 模型中水源涵养模块是基于水量平衡原理估算产水量,结合研究区地形、气候、土壤深度、土地利用类型等因素,运用降水量减去实际蒸发量来计算栅格水源涵养量。水源涵养模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设和年平均降水量。水源涵养量计算公式如下:

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{jx} ——第 j 类土地利用类型在栅格单元 x 中的水源涵养量(mm); AET_{xj} ——第 j 类土地利用类型在栅格单元 x 中的年实际蒸散量(mm); P_x ——栅格单元 x 的年平均降水量(mm); $\frac{\text{AET}_{xj}}{P_x}$ 基于 Budyko 曲线^[16],计算公式如下:

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

式中: R_{xj} ——第 j 类土地利用类型在栅格单元 x 的干燥度指数,无量纲,为蒸散量与降水量的比值; ω_x ——自然气候—土壤性质的非物理参数(无量纲),计算公式如下:

$$\omega_x = Z \frac{\text{AWC}_x}{P_x} + 1.25 \quad (3)$$

式中: AWC_x ——栅格单元 x 的植被可利用水含量(mm),由土壤质地和土壤有效深度决定,确定土壤为植物生长提供的水量; Z ——Zhang 系数。

$$R_{xj} = \frac{k \times \text{ET}_0}{P_x}, k = \begin{cases} \frac{\text{LAI}}{3} & (\text{LAI} \leq 3) \\ 1 & (\text{LAI} > 3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ET_0 ——潜在蒸散量 (mm/d); k ——蒸散系数, 由 LAI(植被叶面积指数) 获得。

2.2 模型数据及参数

InVEST 模型水源涵养模块所需数据分别为降雨量、潜在蒸散量、土壤深度、植被可利用水含量、土地利用/土地覆被、流域及子流域, Zhang 系数。模块中所需数据图地理坐标均为 Beijing_1954_3_Degree_GK_Zone_41。数据来源见表 1—2。

表 1 大凌河流域土壤数据

土壤类型	土壤参考深度/cm	沙粒含量/%	粉粒含量/%	黏粒含量/%	有机碳含量/%
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
石灰性始成土	100	70	14	16	0.34
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
石灰性始成土	100	70	14	16	0.34
石灰性淋溶土	100	47	23	30	0.30
石灰性淋溶土	100	47	23	30	0.30
石灰性淋溶土	100	47	23	30	0.30
潜育土	100	39	27	34	0.28
潜育土	100	68	10	22	0.30
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
石灰性始成土	100	34	43	23	0.43
饱和浅层土	100	—	—	—	—
饱和粗骨土	100	51	31	18	0.40
石灰性粗骨土	100	40	35	25	0.47
石灰性冲积土	100	36	46	18	0.40
石灰性冲积土	100	36	46	18	0.40
弱发育淋溶土	100	37	34	29	0.36
弱发育淋溶土	100	37	34	29	0.36
弱发育淋溶土	100	37	34	29	0.36
弱发育淋溶土	100	37	34	29	0.36
弱发育淋溶土	100	37	34	29	0.36
潜育土	100	39	27	34	0.28
饱和始成土	100	41	34	25	0.37
饱和始成土	100	67	16	17	0.40

注: 土壤数据来源于联合国粮农组织和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库, 饱和浅层土部分数据缺失, 为保证模型正常运行, 输入数值为 0。

2.2.1 降雨量 根据中国气象数据网 2015 年大凌河流域内 15 个气象站点数据, 计算年平均降雨量值, 通过 ArcGIS 软件进行 Kriging 插值, 得到降雨量栅格图。

2.2.2 潜在蒸散量 本文选取 Modified-Hargreaves 法公式^[17]计算潜在蒸散量, 其公式为:

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

式中: RA——太阳大气顶层辐射 [MJ/(m²·d)]; T_{avg} ——日最高气温均值和日最低气温均值的均值 (°C); TD——日最高气温均值与日最低气温均值的

差值 (°C), 其中太阳大气顶层辐射、气温数据均由中国气象数据网获得, 通过 ET_0 公式计算后, 由 ArcGIS 软件空间分析模块 Kriging 插值得到所需潜在蒸散量栅格图。

2.2.3 土壤深度 土壤深度数据来源于联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 构建的世界土壤数据库 (harmonized world soil database version) (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>)。在 ArcGIS 中经空间分析、转换工具模块处理, 获得土壤深度图层。

2.2.4 植被可利用水含量 植被可利用水含量可评估土壤为植被生长所储蓄的总水量, 也可确定田间持水量和萎蔫点的差值^[18]。计算公式选取周文佐等^[19]所提出的 AWC 模型进行估算, 公式如下:

$$AWC = [54.509 - 0.132 \times SAN - 0.03 \times SAN^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times SIL^2 - 0.738 \times CLA + 0.07 \times CLA - 2.688 \times C + 0.501 \times C^2] \times 100\% \quad (6)$$

式中: SAN——土壤的沙粒含量 (%); SIL——土壤的粉粒含量 (%); CLA——土壤的黏粒含量 (%); C——土壤的有机质含量 (%).

大凌河流域土壤数据如表 1 所示。将获得的数

据经公式 (6) 计算后, 运用 ArcGIS 空间分析模块中 Kriging 插值功能, 得到所需植被可利用水含量图层。

2.2.5 土地利用/土地覆被 基于地理空间数据云 Landsat 8 所提供的研究区 2015 年分辨率 30 m 遥感影像图, 在 ENVI 软件中分别通过几何校正、融合、镶嵌、裁剪处理, 采用监督分类方法进行解译, 将研究区土地利用类型分为林地、草地、耕地、城镇及工矿用地、水域及水利设施和其他用地 6 类。

2.2.6 流域、子流域划分 基于研究区 DEM 数据, 利用 ArcGIS 软件平台空间分析模块中的水文分析, 分别进行填洼、流向、流量、河流链接、栅格计算器及分水岭的处理。由于将流域划分数量较多时, 模型运行后, 部分栅格单元数据缺失, 经过多次模型运行及调整, 最终将研究区划分为 162 个流域和 283 个子流域。

2.2.7 Zhang 系数 Zhang 系数, 是表征降水特征的常数^[14]。Zhang 系数可以通过 $Z = 0.2N$ 计算, N 表示降水事件, Zhang 系数受年降水次数影响, 年降水次数越多值越大, 其范围为 1~30。模型默认值 5, 本文根据研究区年平均降雨量和年降水次数, 以及水源涵养模型的运行与校正, 最终本文采用 Zhang 系数数值为 22.5。

表2 数据来源及处理方法

数据	数据需求及处理	原始数据来源
土地利用/土地覆被	栅格图/遥感影像解译	地理空间数据云
降水量	栅格图/ArcGIS空间插值	中国气象数据网
潜在蒸散量	栅格图/计算气象站点降雨量、日气温、太阳辐射数据后,应用 ArcGIS 进行空间插值	中国气象数据网
土壤深度	栅格图/ArcGIS空间分析、转换工具进行数据处理	联合国粮农组织构建的 1:100 万土壤数据
植被可利用水含量	栅格图/基于周文佐的非线性拟合土壤 AWC 估算模型计算,应用 ArcGIS 进行空间插值	联合国粮农组织构建的 1:100 万土壤数据
流域、子流域	矢量/基于 DEM 图,运用 ArcGIS 空间分析模块中水文分析功能进行流域划分	地理空间数据云

3 结果与分析

3.1 水源涵养量评估

大凌河作为辽宁省朝阳市重要水源涵养区,为朝阳市提供生活用水、工业用水。对大凌河水源涵养量的评估对朝阳市的生产生活、经济发展具有重要作用。近年来张丹等^[20]、吴丽等^[21]、刘鑫等^[22]研究发现,大凌河上游地区径流呈显著的下降趋势,大凌河上游地区水源涵养量分析对大凌河流域水源涵养功能评估具有指导意义。

研究区 2015 年水源涵养量分布不均,水源涵养深度最低值、最高值分别为 63.33、410.6 mm,水源涵养总量达 $1.823 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。根据 ArcGIS 软件平台自然断点分级法(Jenks)将研究区水源涵养量划分 5 级(如图 1 所示)。

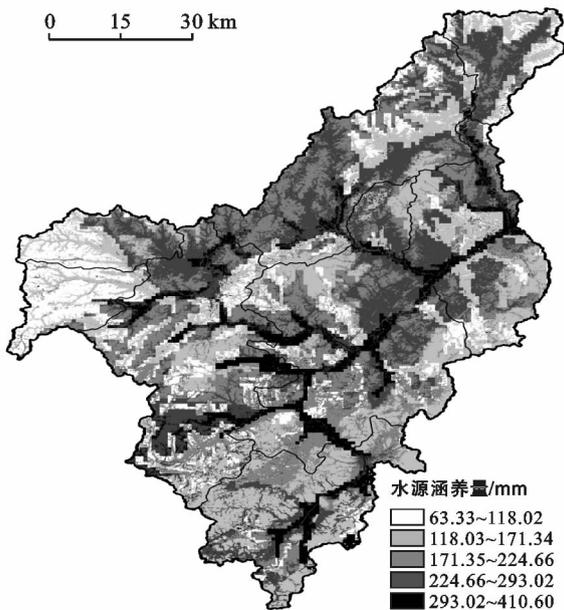


图1 大凌河流域水源涵养量空间分布

内蒙古宁城县西部、敖汉及河北平泉县处于水源涵养量低值区,大凌河干流、老虎山河及深井河等支流地区水源涵养量较高,水源涵养量为 293.03~

410.6 mm,但覆盖面积较小。辽宁省凌源市北部、建平县西南、喀喇沁左翼蒙古族自治县东北部水源涵养量相对较高,其他地区水源涵养高值、低值均有分布且分布零散。

3.2 水源涵养重要性评估

3.2.1 水源涵养归一化等级划分 依据所得 2015 年研究区水源涵养量图,按照统一分类标准,在 ArcGIS 软件平台下对研究区水源涵养量进行归一化处理^[23],划分方法如下:

$$Y_{ij} = (Y_{ijx} - \min Y_{ij}) / (\max Y_{ij} - \min Y_{ij}) \quad (7)$$

式中: Y_{ij} ——标准化的生态系统水源涵养量; Y_{ijx} ——栅格单元生态系统水源涵养量; $\min Y_{ij}$ ——生态系统水源涵养量最小值; $\max Y_{ij}$ ——生态系统水源涵养量最大值。

在 ArcGIS 平台中将标准化处理的水源涵养量依据分位数分类方法划分为 5 级,分别是 0~0.2 (低),0.21~0.4 (较低),0.41~0.6 (中),0.61~0.8 (较高),0.81~1 (高),如图 2 所示。

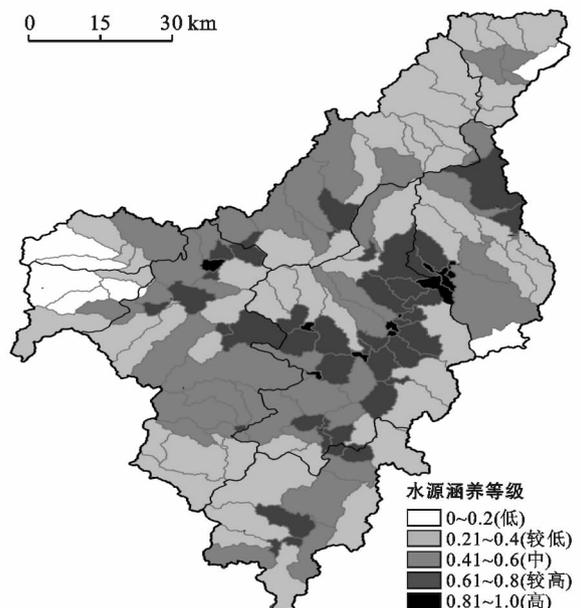


图2 大凌河流域水源涵养等级划分

水源涵养等级较高区位于喀喇沁左翼蒙古族自治县中部、北部,朝阳县北部亦有分布,2个区域植被覆盖率较高,有助于截留作用,促使水源涵养量增加。水源涵养等级较低区为内蒙古宁城县、敖汉旗北部、河北平泉县,该地区森林覆盖率相对较低,截留率低,降水量少且蒸散量较高,至使此部分地区水源涵养量少,等级低。从研究区总体来看,水源涵养中等级占据面积大,分布范围广,低等级与高等级区覆盖面积小。

研究区水源涵养等级面积如图 3 所示。水源涵养低等级地区,面积为 262.59 km²,占研究区总面积的 2.8%,较低等级区所占面积为 2 139.64 km²,占研究区面积的 22.9%,中等级、较高等级覆盖面积较高,分别为 3 234.15,2 599.08 km²,所占比例分别为 34.7%,27.9%,高等级区面积为 1 095.29 km²,比例为 11.7%。通过面积及所占比例可知,研究区水源涵养程度大部分处于中等级别,高等级所占面积较小,作为辽河重要组成部分,朝阳市重要水源区,水源需得到有效管理及利用。

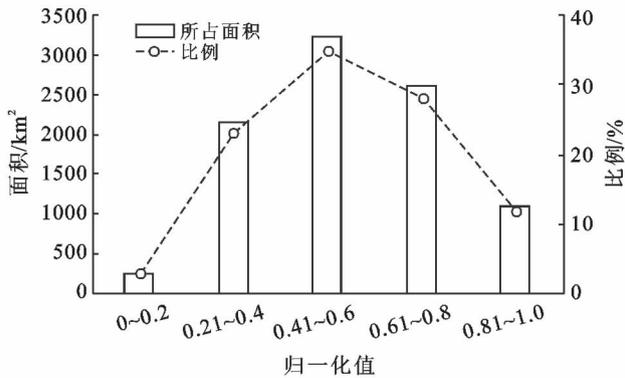


图 3 大凌河流域水源涵养等级面积

3.2.2 水源涵养重要性空间分级 为了划分研究区水源涵养重要区,参考《生态功能红线划定技术指南》分级方法,在 ArcGIS 软件中运用分位数分类方法,对研究区水源涵养重要性进行 5 级分类,分别为一般重要区[0~115 m³/(hm²·a)],较重要区[115~145 m³/(hm²·a)],中度重要区[145~175 m³/(hm²·a)],高度重要区[175~215 m³/(hm²·a)],极重要区[>215 m³/(hm²·a)]。

划分结果(图 4)表明,敖汉旗中部为高度重要区,一般重要区分布于该地周边;宁城县西南部为一般重要区,东北部为高度重要区;平泉县整体为一般重要区,较重要区零星分布其中;朝阳县极重要区占据较大区域,中部为较重要区;喀喇沁左翼蒙古族自治县东北部为水源涵养极重要区,其他级别分区均有

分布。高度重要、极重要的区域视为重要的水源涵养区,朝阳县与喀喇沁左翼蒙古族自治县东北部交界处,凌源市北部,为研究区重要水源涵养区,该地区年平均降雨量相对大,潜在蒸散量小,且部分处于大凌河干流地区,水系较发达,年径流量大,水源涵养量高。受降水和潜在蒸散量等因素的影响,重要区在研究区中部地区分布相对集中,一般重要区受地形、潜在蒸散量的影响,分布于研究区山地及海拔较高地区。

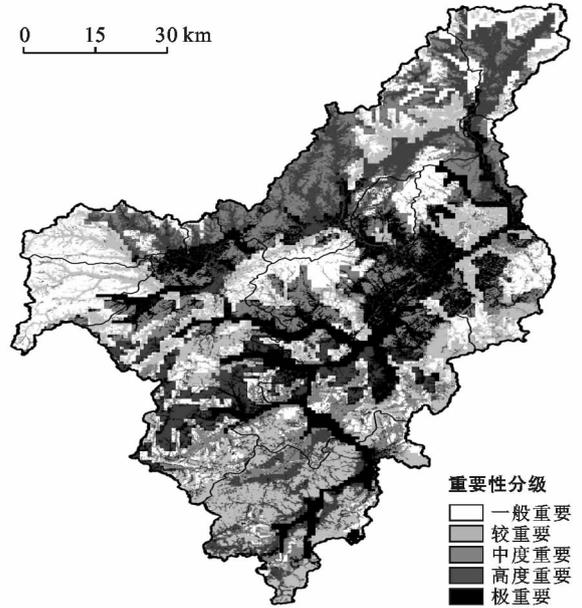


图 4 大凌河流域水源涵养重要性分区

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 生态系统服务水源涵养功能在人类福祉中起关键性作用。2015 年大凌河上游地区水源涵养量为 63.33~410.6 mm,水源涵养总量为 1.823×10⁹ m³。水源涵养量与降水量呈正相关,与潜在蒸散量为负相关,除此之外也受土壤深度、植被覆盖度、土地利用类型等因素的制约喀喇沁左翼蒙古族自治县、朝阳县西南部、大凌河干流及支流丰富地区水源涵养量较高,平泉县宁城县南部地区水源涵养量较低,水源涵养量空间分布不均。

(2) 依据归一化等级划分方法将研究区水源涵养量划分为五级,其中中等和极高等面积广泛,2个级别约占据整个研究区面积的 62.5%。基于径流、植被覆盖率等因素对水源涵养的影响,研究区水源涵养量差异较大。水源涵养量与该地区植被覆盖度、农作物生产、人们的生产生活之间相互影响、相互制约。

(3) 将研究区水源涵养功能进行重要性分区,可

知喀喇沁左翼蒙古族自治县、朝阳县西南部为重要水源涵养区。一般重要区主要分布在研究区西部等地,研究区水源涵养重要性分级空间分布差异明显。

4.2 建议

(1) 研究区为河流上游汇水区,该地区的水源涵养量保持对下游及整个流域起着决定性作用。植被利于截留作用,应加强流域植被覆盖建设,继续实施退耕还林还草政策,积极推动三北防护林工程发展,促进水源涵养量增加。

(2) 建立生态保护红线,确保《中华人民共和国水法》一系列有关水源保护政策的有效实施,努力平衡经济发展与水源保护之间的关系,切实保护水源涵养量,实现可持续发展。在维持水源涵养量的同时,也需注重大凌河上游地区水质问题,保证水源不被污染。

(3) 本文划分的水源涵养重要区,主要分布于研究区中部南部,要对水源涵养重要区实行优先保护、重点保护,一般重要区分布于研究区周边地区,因此要平衡好重点保护区与其他地区的关系。

自 InVEST 模型被国内学者运用以来,学者主要研究的模块集中于水土保持、水源涵养、碳储量,对其他模块的研究较少。InVEST 模型分为 3 个不同的层次,现阶段研究大多停留在第一层定量的研究与第 2 层价值量的研究,在未来的研究中会有第 3 层次各种相关复杂模型的综合运用研究的延伸。模型由美国开发,中国与美国自然环境存在一定差异,今后在模型的运用中,模型参数调整会进一步考虑国内自然等因素,使其在国内得到更深入的发展。

InVEST 模型水源涵养模块默认 Zhang 系数为 5,本文经多次模型运行最终选取 22.5 为本文研究 Zhang 系数值,存在一定误差。研究中土壤深度数据是由联合国粮农组织构建的世界土壤数据库提供的 1:100 万土壤数据,为土壤参考深度,对模型运行结果产生一定的影响,有待进一步加强。

[参 考 文 献]

[1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.

[2] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报,1999,10(5):635-640.

[3] 欧阳志云,赵同谦,王效科. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(10):2091-2099.

[4] 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.

[5] Mansoor D K, Leha M D, Matlock E C, et al. Quanti-

fyng and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2013,165(1751):6-18.

- [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] 吴哲,陈歆,刘贝贝,等. InVEST 模型及其应用的研究进展[J]. 热带农业科学,2013,33(4):58-62.
- [8] 马良,金陶陶,文一惠,等. InVEST 模型研究进展[J]. 生态经济,2015,31(10):126-179.
- [9] 唐尧,祝炜平,张慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J]. 生态科学,2015,34(3):204-208.
- [10] 胡胜,曹明明,刘琪,等. 不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比[J]. 地理研究,2014,33(12):2393-2406.
- [11] 荣月静,张慧,赵显富. 基于 InVEST 模型近 10 年太湖流域土地利用变化下碳储量功能[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):447-451.
- [12] 陈骏宇,刘钢,白杨. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J]. 水利经济,2016,32(2):25-30.
- [13] 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,2013,23(1):183-189.
- [14] 张雪峰,牛建明,张庆,等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局[J]. 干旱区研究,2016,33(4):814-821.
- [15] Zhang Canqian, Li Wenhua, Zhang Bao. Water yield of Xitiaoxi River Basin based on InVEST modeling[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012,3(1):50-54.
- [16] Zhang L, Hickel K, Dawes W R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. Water Resources Research, 2014,40(2):89-97.
- [17] 陈风琴,石辉. 缙云山常绿阔叶林土壤大空隙与入渗性能关系初探[J]. 西南师范大学学报,2005,30(2):350-353.
- [18] 贾芳芳. 基于 InVEST 模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京:中国地质大学,2015.
- [19] 周文佐,刘高焕,潘剑军. 土壤有效含水量的经验估算研究[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(4):89-93.
- [20] 张丹,周惠成. 大凌河流域上游水资源变化趋势及成因研究[J]. 水文,2011,31(4):81-87.
- [21] 吴丽,张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):10-15.
- [22] 刘鑫. 大凌河流域径流演变规律分析[J]. 水土保持研究,2015,22(2):165-170.
- [23] 王小琳. 基于 InVEST 模型的贵州省水源涵养功能研究[D]. 贵州:贵州师范大学,2016.