

沁河源区水源涵养功能辐射效益研究

郭新亚, 杜世勋, 宁 婷, 李 霞, 桑满杰, 张梦莹

(山西省生态环境研究中心, 太原 030009)

摘 要:以沁河源区为例,分析了水源涵养功能空间分布特征,通过构建辐射效益评估模型,估算了其水源涵养辐射量,并对辐射量和水源涵养量进行了对比。结果表明:(1) 沁河源区 75.40% 的区域覆盖着落叶阔叶林和常绿针叶林,土壤以粉砂壤土和壤土为主,渗透性较强,水源涵养量均值 234.75 m^3 ,总量 3.52 亿 m^3 ,水源涵养辐射量均值 168.41 m^3 ,总量 2.14 亿 m^3 ;(2) 99.30% 的林地具有水源涵养辐射效益,林地斑块的实际辐射量占供给量的 64.89%,辐射总量 1.91 亿 m^3 ;(3) 97.12% 的草地具有水源涵养辐射效益,草地斑块的实际辐射量占供给量的 97.76%,辐射总量 0.22 亿 m^3 ;(4) 94.89% 的耕地具有水源涵养辐射效益,耕地斑块的实际辐射量占供给量的 92.98%,辐射总量 0.24 亿 m^3 。

关键词:河源区;水源涵养;辐射量

中图分类号:S727.21

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0365-05

Study on Radiation Benefit of Water Conservation Function in the Headstream Area of the Qinhe Basin

GUO Xinya, DU Shixun, NING Ting, LI Xia, SANG Manjie, ZHANG Mengying

(Research Center for Eco-Environment Sciences in Shanxi, Taiyuan 030009, China)

Abstract: The spatial distribution characteristics of water conservation function and radiation benefit were analyzed via constructing a radiation benefit assessment model. The amount of radiation benefit and water conservation function were compared. The results showed that: (1) 75.40% of the study area was covered by deciduous broad-leaved forests and evergreen coniferous forests; loam and silt loam are the main soil types in the study area, these soils have the strong permeability, the mean volume of 234.75 m^3 water and a total volume of 0.352 billion m^3 water were conserved in the study area, the mean volume of 168.41 m^3 water and a total volume of 0.214 billion m^3 water were radiated in the study area; (2) 99.30% of forestlands have radiation functions and the actual radiation amount of forest patch accounts for 64.89% of the water conservation capacity, which provide the total amount of radiation of 0.191 billion m^3 ; (3) 97.12% of grasslands and an average of 97.76% of water conservation capacity have radiation function, which provides a total amount of radiation of 2.2 billion m^3 ; (4) 94.89% of farmland and an average of 92.98% of water conservation capacity have radiation functions, which provide a total amount of radiation of 24 million m^3 .

Keywords: headstream area; water conservation; radiation benefit

“河源区”作为一种重要的生态功能区,具有极高的水源涵养服务功能和很好的生态效益,可为中下游地区提供生态保障,对河源区保护程度的好坏直接影响中下游以致整个流域范围的生态环境的好坏。目前关于生态系统服务的研究主要以 Costanza^[1]、Chopra^[2]等的研究成果最具代表性。国内关于河源区生态系统服务功能的研究较少,赖敏等^[3]对三江源地区的单位生态服务价值进行了修正,估算了生态修

复额度;赵秀敏^[4]通过开展辽河源头的生态系统服务功能评价,分析了生态系统功能演变及其成因。沁河为黄河一级支流,其源头区的森林覆盖率高达 53% 以上,其中油松林资源质量属全国最好,还有广茂的华北落叶松林、辽东栎林、山杨林、白桦林等,较好的自然生态系统对于维持和提高源头径流能力、防治沁河上游的水土流失、维护生物多样性和生物多样性的栖息环境、实现自然资源的可持续利用具有重要的意义。

生态系统服务功能具有空间流动性,一个地区的生态系统服务功能不仅对本区域具有一定的生态效益,而且某些服务功能会通过某些途径在空间上流动到系统之外的地区,对区域外的地区产生一定的辐射效益,其中水源涵养的辐射效益是指上游集水区域植被与土壤所涵养的水分通过河流水系等输水通道转移到中下游地区产生的服务效用^[5]。国内学者开展了一些辐射效益方面的研究,韩永伟等^[5]对黑河下游重要生态功能区防风固沙功能的辐射距离和辐射量进行了估算,李庆旭等^[6]通过测量城市间的直线距离来估算生态系统服务受益区,陈璐^[7]通过构建辐射效益评估模型对洪水调蓄、大气调节、净化水质、涵养水源等的辐射量进行了估算。但是国内学者对辐射效益的量化研究甚少,且对水源涵养的辐射效益一般换算成价值量进行估算,直接计算辐射量的较少。本文在水源涵养辐射效益的概念上,以水文循环为基础,构建辐射效益评估模型,并以沁河源区为例,估算水源涵养辐射量。

本文利用水量平衡法研究沁河源区水源涵养功能空间分布特征,通过构建辐射效益评估模型,估算其水源涵养辐射量,并对辐射量和水源涵养量进行对比,研究沁河源区的辐射效益空间分布特征,以期在水源涵养功能的辐射效益研究提供一定的参考,并对在河源区以及流域范围研究中的应用提供一定的借鉴作用,同时开展河源区生态服务效益的探索与研究,对认识河源区的重要生态功能、实行河源区的保护具有重要意义。

1 研究区概况

沁河,属于黄河一级支流,干流总长 485 km,流域面积 13 532 km²,发源于山西省长治市沁源县霍山东麓的二郎神沟,源头至孔家坡段为河源区,长度 69 km,区域面积 1 360.71 km²(图 1)。研究区地处我国东部季风区暖温带半湿润地区的西缘,大陆性季风气候显著,四季分明,雨热同期。研究区内的海拔高度范围为 0~2 500 m,大部分区间属于山区型峡谷,坡陡流急,水多沙少,河道平均纵坡为 3.8‰,水能资源丰富。以石质山区为主,干流河道大部分为砂页岩地层,水量渗透较少。

2 数据与方法

2.1 数据资料

本文的气象数据来源于研究区周围 18 个气象站点所提供的 2001—2015 年气象资料,其中将整理出的各站点年降雨数据根据经纬度坐标导入到 Arc-

GIS,利用 ArcGIS 中的克里金插值得到研究区多年平均降水量栅格图;土地利用类型数据基于 2015 年高分影像数据解译获得;土壤属性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所构建的世界土壤数据库(HWSD v1.1);DEM 数据来自 ASTER GDEM,空间分辨率为 30 m。

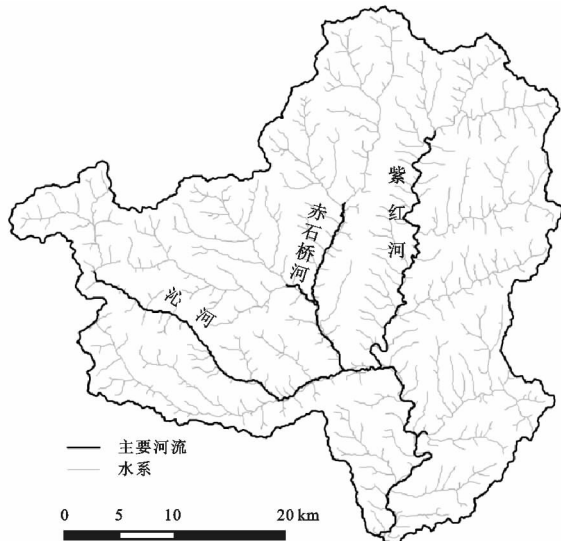


图 1 沁河源区水系

2.2 水源涵养量计算

水源涵养是森林、草地等生态系统对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸散发实现对水流、水循环的调控,主要表现在缓和地表径流、补充地下水、减缓河流流量的季节波动、滞洪补枯、保证水质等方面。水源涵养功能的评价方法主要有水量平衡法、综合蓄水量法、降水存储量法、模型法等。其中水量平衡法是研究水源涵养机理的基础,能够比较准确地计算水源涵养量,且可操作性强,使用频率最高。

采用水量平衡法进行水源涵养生态功能评价。

$$W = \sum (10 \times A_i \times F_i \times K_i \times P_i \times \alpha) \quad (1)$$

式中:W 为生态系统水源涵养量(m³);P_i 为评价区域多年平均降水量(mm);A_i 为土地利用类型的面积(hm²);F_i, K_i 分别为该类型的覆盖率与发育度指数;α 为径流系数。

大量研究表明,植被生长状态最好的指标数据就是植被指数,其中,归一化植被指数(NDVI)和植被覆盖度的相关性最大,故植被覆盖度的计算公式如下:

$$F_i = \frac{NDVI_i - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (2)$$

式中:NDVI_v 和 NDVI_s 分别是茂密植被覆盖和完全裸土像元的 NDVI 值。

发育度与林地成熟度和保护状态有关,原始森林约为 1.0,其他地方小于 1.0。根据已有研究^[8-9],具体赋值见表 1。

表 1 生态系统类型 K 值

森林	其他林地	优良草地	退化草地	耕地	水域	其他地类
1	0.9	1	0.95	1	1	1

径流系数是指一定汇水面积的地面径流量与降水量的比值,表示降水量中形成径流的比例。根据已有研究^[8-9],具体赋值见表 2。

表 2 生态系统类型 α 值

森林	其他林地	优良草地	退化草地	耕地	水域	其他地类
0.73	0.6	0.5	0.95	0.5	0.99	0.01

2.3 辐射效益估算

某地区的水源涵养量有两方面的作用,一方面用于满足自身的需求,另一方面植被和土壤所涵养的水量通过下渗形成地下水,汇入到河流,通过河流水系等输水通道流入中下游,为中下游地区提供一定的水资源量,从而产生一定的辐射效益。故水源涵养的辐射效益是指森林、草地、河流等生态系统所涵养的水分通过河流水系等输水通道转移到中下游地区产生的服务效用。根据产生机理的不同,分别对森林、草地、农田和河流生态系统进行辐射效益估算。

2.3.1 森林生态系统 森林生态系统所涵养的水量包含 3 部分,即冠层截留量、枯枝落叶含水量和土壤蓄水量^[10]。

对于森林和草地生态系统,土壤里储存的水一部分留在土壤孔隙中,一部分进行下渗,只有超过田间持水量,才能形成自由重力水,从而形成地下水。森林生态系统辐射效益的评估需确定土壤蓄水量及田间持水量,进而确定可渗入地下的水量,假设可渗入地下的水量都汇入河流,对下游产生服务效用,则这部分水量即为辐射量。辐射量估算步骤如下:

(1) 确定土壤蓄水量^[11-12]。基于水量平衡确定土壤蓄水量,计算林冠层截留量和枯枝落叶含水量,与水源涵养量相减得到土壤蓄水量。

$$Q_1 = P \times b \times A \times 10 \tag{3}$$

$$Q_2 = c \times A \tag{4}$$

$$S = Q_1 - Q_2 \tag{5}$$

式中:S 为土壤蓄水量(t); Q_1 为林冠层截留量(t); Q_2 为枯枝落叶含水量(t); P 为降雨量(mm); A 为面积(hm^2); b 为林冠截留率(%); c 为枯枝落叶层最大持水量(t/hm^2)。

(2) 确定田间持水量。根据 Larson 等^[13]于 1979 年提出的公式进行计算田间持水量:

$$\text{FMC} = 0.003075n_1 + 0.005886n_2 + 0.008039F + 0.002208O - 0.1434R \tag{6}$$

式中: n_1 为土壤砂粒含量百分比(%); n_2 为土壤粉砂粒含量百分比(%); F 为土壤黏粒含量百分比(%);

O 是土壤有机质含量(%); R 为土壤容重(g/cm^3)。

土壤水分超过田间持水量,多余的水分就会渗透,没有不透水层的干扰,就会在重力作用下渗透到地下水中去。如果土壤蓄水量大于田间持水量就会形成地下径流,如果小于,则不汇入地下水。

(3) 估算辐射量。土壤蓄水量减去田间持水量即为可渗入地下的水量,即为辐射量。

2.3.2 草地生态系统和农田生态系统 草地生态系统和农田生态系统所涵养的水量为土壤蓄水量。通过计算水源涵养量,得到土壤蓄水量,再计算田间持水量,得到可渗入地下的水量,即辐射量。

2.3.3 河流生态系统 降雨落入河流后不产流,河流的水源涵养量为降雨量减去蒸发量后的水量。这部分水量一方面可维护本地河流自身的生态需求,另一方面流向下游,保证下游水量,其次也可提供水资源供人类需求。因本研究区为沁河源区,该区域位于河流的源头,山高坡陡,人类的可达性较差,使得人类从河流中取水的可能性较小,故本研究排除人类取水的影响,认为河流所涵养的水量均可流向中下游,从而对中下游产生辐射效益,则沁河源区内的河流的水源涵养量即为辐射量。

2.4 辐射比计算公式

就某一栅格斑块而言,雨水降落到斑块后,除去径流和蒸发量后的水量为该斑块的水源涵养量,但水源涵养量并非可以全部下渗到地下汇入地下水,通过河流水系汇入下游,从而产生一定的辐射效益,故具有辐射效益的水源涵养量占总水源涵养量的一定比例。本文运用水源涵养的辐射百分比进行水源涵养供给量和辐射量的对比,该比例可用来反映特定区域内生态系统的实际辐射量和供给量之间的关系,计算公式如下:

$$a = \frac{M}{W} \tag{7}$$

式中: a 为辐射比; W 为生态系统水源涵养量(m^3); M 为生态系统水源涵养辐射量(m^3)。

3 结果与分析

3.1 沁河源区水源涵养功能空间分布特征

基于水量平衡法,得到栅格分布式的沁河源区水源涵养量($30\text{ m} \times 30\text{ m}$),结果如图 2 所示。

沁河源区多年平均水源涵养量为 234.75 m^3 ,水源涵养总量达 3.52 亿 m^3 。水源涵养功能在研究区内表现出明显的空间差异,水源涵养功能较高的地区主要集中在以落叶阔叶林和常绿针叶林覆盖为主的区域,主要原

因在于这些地区林地覆盖度高,虽然蒸发作用强烈,但是雨水截留量大,径流产生少,土壤保水能力高,因而水源涵养量较高。水源涵养功能次高的地区主要集中在以灌木林和草地覆盖为主的区域,与有林地相比,其蒸腾作用相对较弱,但土壤的蓄水能力亦较弱,且易产生地表径流。居住地、工业用地和采矿场等建设用地的蓄水能力弱,径流量大、汇流时间短,降雨多以地表径流的形式流走,水源涵养功能差。

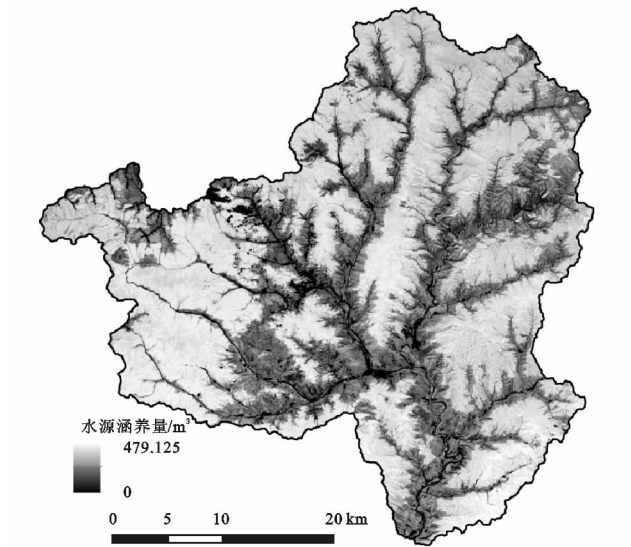


图 2 沁河源区水源涵养功能

研究区内的生态系统类型包括森林、草地、农田、河流和城镇生态系统,其中林地的面积最大,占研究区总面积的 75.40%;其次为旱地(190.97 km²),占总面积的 14.04%;草地面积次之,包括草丛(106.25 km²)和草甸(15.26 km²);建设用地和河流的面积最小,仅占总面积的 1.52%和 0.11%。将水源涵养量与土地利用类型叠加,得到不同土地利用类型的水源涵养总量和单位面积

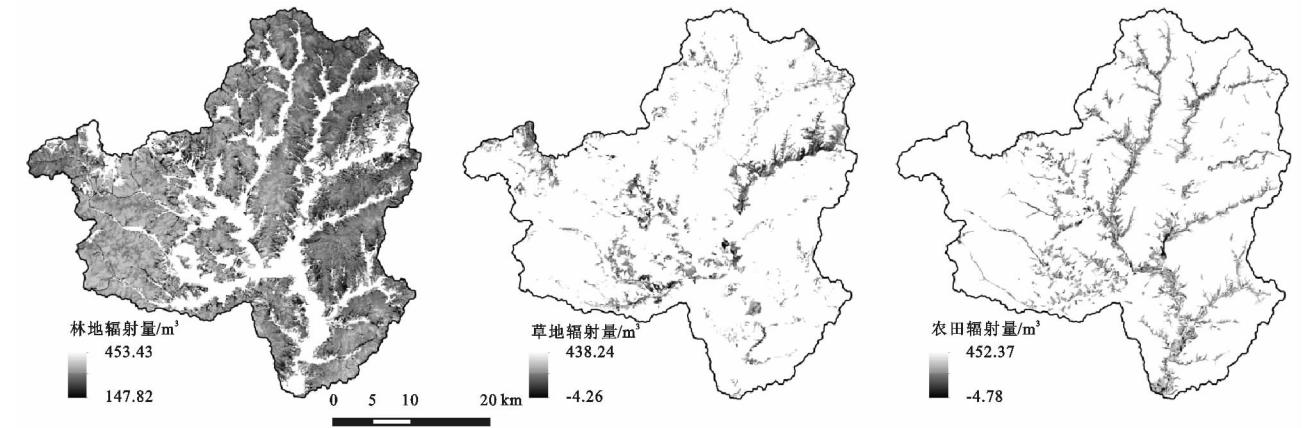


图 3 沁河源区林地、草地和农田辐射功能

研究区内林地包括落叶阔叶林、常绿针叶林和落叶阔叶灌木林,面积分别为 412.27, 397.85, 213.43 km²,其中落叶阔叶林以栎林为主,常绿针叶林以油

水源涵养能力(表 3)。不同土地利用类型水源涵养总量不同,大小依次为:落叶阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶灌木林>旱地>草丛>草甸>河流>农村宅基地>风电项目>采矿场>工业用地。林地和草地的水源涵养量最多,占研究区水源涵养总量的近 94%。农村宅基地水源涵养总量大于河流、工业用地等主要是由于其面积较大。此外,不同土地利用类型单位面积水源涵养能力也不同,大小依次为:常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶阔叶灌木林>草甸>草丛>河流>旱地>采矿场>农村宅基地>风电项目>工业用地。常绿针叶林与落叶阔叶林相比,叶面积较小,蒸发作用小,故水源涵养量均值较大;研究区内的草甸是山西屈指可数的典型亚高山草甸之一,主要生长矮草类高山植物,与草丛相比,植被茂盛且覆盖度高,水源涵养能力相对也较好。

表 3 不同土地利用类型的水源涵养能力

生态系统类型		水源涵养	单位面积水源
一级	二级	总量/万 m ³	涵养能力/mm
森林生态系统	常绿针叶林	19810.76	322.46
	落叶阔叶林	21601.68	316.07
	落叶阔叶灌木林	6451.36	201.59
草地生态系统	草丛	3148.33	160.97
	草甸	504.54	162.89
农田生态系统	旱地	3160.34	153.46
河流生态系统	河流	185.73	155.50
城镇生态系统	农村宅基地	19.64	46.74
	工业用地	0.07	25.73
	采矿场	0.07	48.72
	风电项目	1.85	45.99

3.2 沁河源区水源涵养功能辐射效益特征

利用水循环得到栅格分布式的沁河源区水源涵养辐射量(30 m×30 m),结果如图 3 所示。

松林为主。就森林生态系统而言,林地通过冠层截留、枯枝落叶层持水和土壤渗透蓄水发挥水源涵养功能^[14],针叶树种的截留降水量较大,阔叶树种次

之,常绿树种较大,落叶树种次之,故常绿针叶林的冠层截留量较落叶阔叶林的大^[15]。依据相关研究成果,取落叶阔叶林和常绿针叶林的林冠截留率为 24.3%和 28.9%^[16-17],落叶阔叶林、常绿针叶林和落叶阔叶灌木林的枯枝落叶层最大持水量分别为 22.5,27.13,34.9 t/hm²^[18-19]。

沁河源区水源涵养辐射平均量为 164.54 m³,总量为 2.38 亿 m³。99.30%的林地具有水源涵养辐射效益,平均辐射量为 172.17 m³,辐射总量达到 1.91 亿 m³,辐射量的空间分布与植被分布有关,辐射较好的区域主要分布在落叶阔叶林区域,其中落叶阔叶

林、常绿针叶林和落叶阔叶灌木林的平均辐射量分别为 179.33,162.13,174.88 m³,辐射总量分别为 0.81 亿 m³,0.71 亿 m³,0.39 亿 m³。97.12%的草地具有水源涵养辐射效益,平均辐射量为 140.99 m³,辐射总量为 0.22 亿 m³。94.89%的农田具有水源涵养辐射效益,平均辐射量为 136.18 m³,辐射总量为 0.24 亿 m³。河流平均水源涵养辐射量为 174.31 m³,水源涵养辐射总量达到 232.94 万 m³。

3.3 沁河源区水源涵养辐射比特征

基于公式(8):得到栅格分布式的沁河源区水源涵养辐射比(30 m×30 m),结果如图 4 所示。

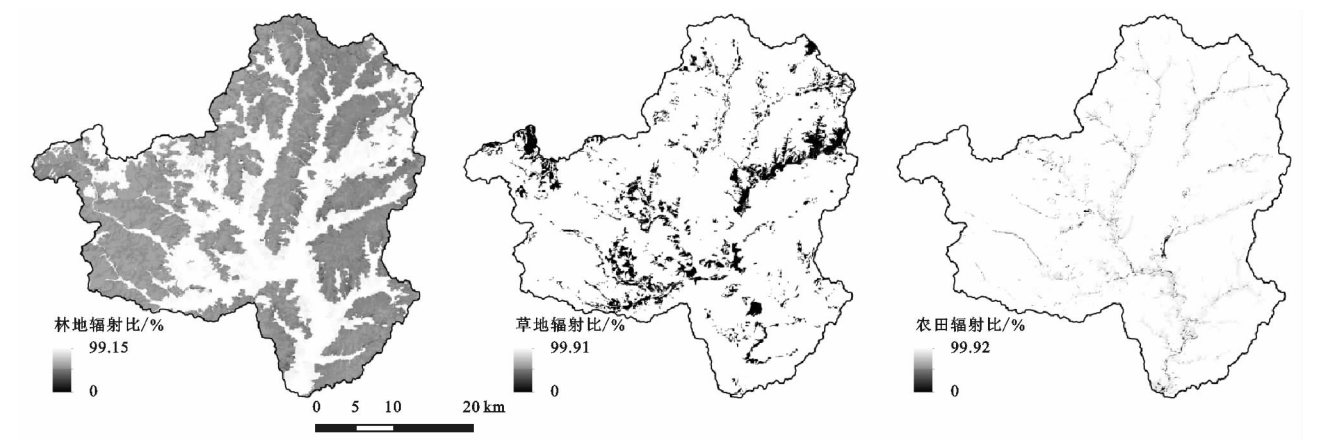


图 4 沁河源区林地、草地和农田水源涵养辐射比

沁河源区内辐射总量占水源涵养总量的 67.61%,具有辐射效益的区域面积占总面积的 96.81%,主要集中在林地、草地、农田和河流区域。就产生辐射效益的区域而言,99.30%的林地具有水源涵养辐射效益,林地斑块水源涵养量的 64.89%可形成地下水汇入河流中;97.12%的草地具有水源涵养辐射效益,草地斑块水源涵养量的 97.76%可下渗至地下水,随水的流动汇入下游区域;94.89%的农田具有水源涵养辐射效益,其中 92.98%的水源涵养量具有辐射效益;河流涵养的水量一部分用于维护生态系统正常功能,一部分流向下流,为下游提供水资源。研究区具有很好的植被覆盖,以落叶阔叶林和常绿针叶林为主,土壤以粉砂壤土和壤土为主,渗透性较强;研究区内有草甸分布,是山西屈指可数的典型亚高山草甸之一,主要生长着矮草类高山植物,植被茂盛且覆盖度高,水源涵养能力相对较好,且林地具有较大的林冠截留,故与草地下渗至地下的水源涵养比例相比,林地下渗的比例较少。

4 结论

(1) 沁河源区多年平均水源涵养量 234.75 m³,水源涵养总量达 3.52 亿 m³。林地和草地的水源涵养量最多,占研究区水源涵养总量的近 94%。不同

土地利用类型单位面积水源涵养能力不同,大小依次为:常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶阔叶灌木林>草甸>草丛>河流。

(2) 沁河源区水源涵养辐射平均量 168.41 m³,总量 2.14 亿 m³。沁河源区 99.30%的林地、97.12%的草地、94.89%的农田和 100%的河流具有水源涵养辐射效益,辐射总量分别为 1.91 亿 m³,0.22 亿 m³,0.24 亿 m³,232.94 万 m³。

(3) 沁河源区林地斑块的实际辐射量占供给量的 64.89%,草地斑块的实际辐射量占供给量的 97.76%,耕地斑块的实际辐射量占供给量的 92.98%。

参考文献:

[1] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. World Environment, 1997,387(1):3-15.

[2] Chopra K, Leemans R, Kumar P, et al. Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses[M]. Island Press, 2005.

[3] 赖敏,吴绍洪,尹云鹤,等.三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度[J].生态学报,2015,35(2):227-236.

[4] 赵秀敏.十一五期间辽河源头区生态系统功能演变及成因分析[D].长春:吉林大学,2015.

- 影响因素的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11): 1977-1983.
- [3] 蔡维英, 刘兴朋, 张继权. 基于分布式 SCS 模型的山地景区山洪灾害模拟研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 15-18.
- [4] Azmeri, Hadihardaja I K, Vadiya R. Identification of flash flood hazard zones in mountainous small watershed of Aceh Besar Regency, Aceh Province, Indonesia[J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Sciences, 2016, 19(1): 143-160.
- [5] 林孝松, 林庆, 王梅力, 等. 山区镇域山洪灾害危险性分区研究: 以跳石镇为例[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 90-96.
- [6] Zhang D, Quan J, Zhang H, et al. Flash flood hazard mapping: A pilot case study in Xiapu River Basin, China[J]. Water Science and Engineering, 2015, 8(3): 195-204.
- [7] 黄国如, 冼卓雁, 成国栋, 等. 基于 GIS 的清远市瑶安小流域山洪灾害风险评价[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 43-47.
- [8] 岳琦, 张林波, 刘成程, 等. 基于 GIS 的福建闽江上游山洪灾害风险区划[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(4): 293-298.
- [9] 赵瑜, 喻块块, 张建伟. 基于县域的山洪灾害风险区划研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(1): 61-64.
- [10] 刘少军, 张京红, 张明洁, 等. DEA 模型在山洪灾害危险性评价中的应用: 以海南岛为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 227-234.
- [11] 叶金印, 李致家, 吴勇拓. 一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 15-19.
- [12] 唐川, 朱静. 基于 GIS 的山洪灾害风险区划[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 87-94.
- [13] 杜俊, 任洪玉, 张平仓, 等. 大空间尺度山洪灾害危险评估的比较研究[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 66-72.
- [14] 高展, 许剑勇, 王胜, 等. 黄山风景区暴雨山洪灾害风险区划研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 281-285.
- [15] 左倩云, 林孝松, 韩贇, 等. 山区镇域山洪灾害危险评价研究[J]. 绿色科技, 2014(2): 223-227.
- [16] Weiss A. Topographic Position and Landforms Analysis[R]. San Diego, Ca: Ersi User Conference, 2001.



(上接第 369 页)

- [5] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 等. 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5185-5193.
- [6] 李庆旭, 张彪, 史芸婷, 等. 张承地区生态系统服务及其区域关联分析[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 38-46.
- [7] 陈璐. 太湖滨湖区重要生态功能区生态服务功能的研究[D]. 江苏苏州: 苏州科技大学, 2016.
- [8] 韩永信, 高吉喜, 刘成程. 重要生态功能区及其生态服务研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [9] 陈翔舜, 魏金平. 甘南黄河重要水源补给区生态功能服务价值评价[J]. 甘肃林业科技, 2007, 32(1): 28-30.
- [10] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 351-360.
- [11] 李佳, 邵全琴, 刘纪远. 基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算: 以江西兴国县为例[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 83-87.
- [12] 秦嘉励, 杨万勤, 张健. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4): 453-458.
- [13] Larson W E, Gupta S C, Useche R A. Compression of agricultural soils from eight soil orders [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(3): 450-457.
- [14] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. 生态环境学报, 2013(3): 451-457.
- [15] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [16] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. 世界林业研究, 2005, 18(1): 49-54.
- [17] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016(4): 603-611.
- [18] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 等. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算[J]. 生态环境学报, 2013(3): 451-457.
- [19] 辛慧. 泰山森林涵养水源功能与价值评估[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2008.