

基于 Budyko 假设和 SCS-CN 模型的 河源区水源涵养功能研究

杜世勋, 郭新亚, 荣月静

(山西省生态环境研究中心, 太原 030000)

摘要:河源区作为一种重要生态功能区,具有重要的生态系统服务功能。以沁河源区为例,利用 Budyko 假设和 SCS-CN 模型研究了其水源涵养功能空间分布特征,并比较了不同土地利用类型、海拔和坡度下的水源涵养能力。结果表明:(1)沁河源区多年平均水源涵养量为 306.48 mm,水源涵养总量为 4.19 亿 m³;(2)不同土地利用类型水源涵养功能不同,落叶阔叶林和常绿针叶林的水源涵养贡献率和水源涵养量均值最大,贡献率分别为 43.99%和 42.00%,水源涵养量均值分别为 330.41 mm 和 364.53 mm;(3)不同海拔高度上水源涵养功能不同,海拔 1 000~1 500 m 地区是水源涵养功能的主体,水源涵养量均值在海拔 1 500~2 000 m 地区最大,为 401.71 mm;(4)不同坡度上水源涵养功能不同,缓坡和斜坡的水源涵养贡献率最大,急坡、陡坡和险坡上水源涵养量均值分别为 373.62 mm,368.32 mm 和 363.94 mm。

关键词:河源区;水源涵养;budyko 假设;SCS-CN 模型

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0147-06

Study on the Water Conservation Function Based on Budyko Hypothesis and SCS-CN Method in the Headstream Area of the Qinhe Basin

DU Shixun, GUO Xinya, RONG Yuejing

(Research Center for Eco-Environment Sciences in Shanxi, Taiyuan 030000, China)

Abstract: The headstream area, as an important ecological function area, has important ecosystem services. The spatial distribution characteristics of water conservation function and water conservation capacity of different land use types, elevation and slope in the headstream area of the Qinhe basin were analyzed using Budyko hypothesis and SCS-CN method. The results indicated that: (1) the 306.48 millimeters of water depth and the 419 million cubic meters of water were conserved in the study area; (2) water conservation functions of different land use types were different; the deciduous broadleaf and evergreen coniferous forests conserving 330.41 mm and 364.53 mm of mean water were the main contributors to water conservation, of which contribution rates were 43.99% and 42.00%, respectively; (3) water conservation differed with attitudes; the areas with the elevation of 1 000~1 500 m were the main parts of water conservation function and the areas with the elevations of 1 000~1 500 m provided the largest water conservation which was 401.71 mm; (4) the different slopes also had different effects on water conservation; the mean values of water conservation on steep slopes, abrupt slopes and risk slopes were 373.62 mm, 368.32 mm and 363.94 mm, respectively.

Keywords: headstream area; water conservation; Budyko hypothesis; SCS-CN method

河源区作为一种重要生态功能区,是主要河流的“河源”和生态系统运行过程的“生态源”,具有独特的生态地位,其水源涵养、水土保持等生态功能的发挥,不仅具有一定的生态环境效益,而且可为中下游地区

经济社会的发展提供生态保障。目前关于生态系统服务的研究主要以 Costanza^[1]、De Groot^[2]等以及 MA(Millennium Ecosystem Assessment)^[3]的研究成果最具代表性,但是国内关于河源区生态系统服务

功能的研究甚少,刘青^[4]对江西东江源区的生态系统服务价值进行了估算,得到不同服务功能的价值及总价值;赵秀敏^[5]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;赖敏、吴绍洪等^[6]对三江源地区的单位生态服务价值进行了修正,进而估算了生态修复额度等。国内学者开展河源区生态服务的探索与研究,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。

水源涵养作为陆地生态系统的重要功能之一,可以改善水文状况、调节区域水分循环、保护可饮用水源等。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。但是国内学者基于水量平衡法对水源涵养功能的研究主要集中于对林地等单一生态系统水源涵养量的研究,对复合生态系统的研究较少,如张彪^[7]、余新晓^[8]等采用水量平衡法仅评估了森林生态系统的水源涵养功能;且水量平衡法中蒸散量因子的研究方法较为简单,基于 Budyko 假设确定蒸散量的研究较少,如张海博^[9]基于 SEBS 计算蒸散发因子,聂忆黄^[10]基于地表能量平衡计算蒸散发因子,这两种方法不能体现下垫面因素的影响,而 Budyko 假设方法计算蒸散发因子的优点是既包含了反映区域大背景的气候因子,又包含了反映局地特征的下垫面参数。

本文将沁河源区作为研究区,利用水量平衡法,基于 Budyko 假设和 SCS-CN 模型,研究沁河源区水源涵养功能空间分布特征,比较不同土地利用类型、海拔和坡度下的水源涵养能力,以期为分析沁河源区水源涵养功能的研究提供一定的参考,并对 Budyko 假设和 SCS-CN 模型在河源区以及流域范围复合生态系统水源涵养功能研究中的应用提供一定的借鉴作用。

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。



图 1 沁河源区水系图

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 1980—2013 年日气象资料,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 ArcGIS,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;土地利用类型数据来自全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目;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(HWSDv1.1);DEM 数据来自 ASTER GDEM,空间分辨率为 30 m。

2.2 Budyko 假设模型

Budyko 根据流域水量和能量平衡,指出流域蒸散发同时受降水和蒸发两个因素的控制,Budyko 假设随着气候越来越干燥,流域多年平均实际蒸散发量逐渐趋近于多年平均降雨量,基于此得出一个半经验公式^[11]:

$$E/P = f(E_0/P) = f(F) \quad (1)$$

式中: E 是实际蒸散发量; E_0 是潜在蒸散发量; P 是降水量; F 为干燥指数。

Zhang 等在 Budyko 假设的基础上得到计算蒸发的解析表达式^[12]:

$$E = \frac{P(1+W \frac{E_0}{P})}{1+W \frac{E_0}{P} + \frac{P}{E_0}} \quad (2)$$

式中: w 为下垫面影响系数,依据土地利用类型取值,耕地、高覆盖林地(覆盖度 $\geq 30\%$)、低覆盖林地(覆盖度 $< 30\%$)、灌丛、草地、人工用地和其他类型用地的 w 值分别取 0.5, 2, 1, 1, 0.5, 0.1, 0.1。

通过 Thornthwaite 法计算潜在蒸散发量 E_0 。Thornthwaite 法是应用较多的方法之一,优点是仅考虑温度变化,其表达式为^[13]:

$$E_0 = 16K \left(\frac{10T_i}{I} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$K = \frac{dm}{360} \quad (4)$$

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (5)$$

$$\alpha = 0.000000675I^3 - 0.0000771I^2 + 0.0179I + 0.492 \quad (6)$$

式中:当 $T_i < 0^\circ\text{C}$ 时, $E_0 = 0$; K 为修正系数; d 为月平均日照时数; m 为每月天数; T_i 为月平均气温 ($^\circ\text{C}$); I 为年热指数; α 为经验指数。

2.3 SCS-CN 模型

径流曲线数模型(SCS-CN 模型)是美国农业部水土保持局于 1954 年研制的小流域设计洪水模型,该模型可以反映不同下垫面及人类活动对降雨径流的影响。由于该模型结构简单、所需参数较小,是一种较好的小型集水区径流计算方法。该方法的公式如下^[14]:

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (7)$$

$$I_a = 0.2S \quad (8)$$

$$R = \frac{(P-0.2)^2}{P+0.8S} \quad P \geq I_a \quad (9)$$

$$R = 0 \quad P < I_a \quad (10)$$

式中: R 为径流深 (mm); S 为可能最大滞留量 (mm); I_a 为降雨初损值 (mm); P 为降雨量 (mm); CN 为径流曲线数,可反映流域综合特征,理论取值范围为 0~100,根据流域产流特征,实际取值范围为 40~98^[15], CN 值越大, S 值越小,越易产生径流,其影响因素包括 3 方面:水文土壤组类型、土地利用类型、土壤前期湿度程度。水文土壤组反映土壤入渗能力的强弱,依据土壤种类将土壤划分为 A, B, C, D 四大类型^[16](表 1)。土壤前期湿度 (AMC) 依据次降雨前五天的降雨总量可分为三级:干旱情况 (AMC I)、正常情况 (AMC II) 和湿润情况 (AMC III)^[17], 研究区属于季风气候区,降雨集中于雨季,产流多以蓄满产流模式出现,雨水通过下渗进入土壤的比例较小,使得在 AMC I 的条件下,初损值偏大,径流量偏小,在 AMC III 的条件下,初损值偏小,径流量偏大,因此本文选取 AMC II 条件计算研究区径流量。根据具体的土地利用方式和土壤类型来确定 CN 值。

2.4 水源涵养量计算

利用水量平衡法计算水源涵养量。将生态系统作为一个闭合的集水区,把大气降水作为生态系统的水分

输入量,蒸发与蒸腾及各种径流量视为水分的输出量,根据水量平衡法,降雨中扣除蒸散发和径流量后的贮水量能有效地贮存降雨和调节地表径流,可视为整个区域水源涵养能力的体现,即为水源涵养量^[9]:

$$\text{WY} = P - E - R \quad (11)$$

式中: WY 为水源涵养量 (mm); P 为多年平均降水量 (mm); E 是实际蒸散发量 (mm); R 为径流深 (mm)。

表 1 SCS 模型土壤分类

CN 类别	土壤种类
A	砂土、壤质砂土、砂质壤土
B	粉砂壤土、壤土
C	砂黏壤土
D	黏壤土、粉质黏壤土、砂黏土、粉砂黏土、黏土

在森林系统中,由于降雨能够很快地地下渗,一般不考虑产流的影响,即森林涵养水源的总量取决于森林地带的降水量和蒸发量。

本文中计算林地水源涵养量时不考虑产流量的影响,其余土地利用类型的水源涵养量则考虑产流量的影响。

3 结果与分析

3.1 沁河源区水源涵养功能空间分布特征

根据水量平衡公式,水源涵养量由降水、蒸散发和径流量决定,依据每个因子的分布情况,以此分析水源涵养量的空间分布特征。

3.1.1 沁河源区降水量、蒸散发量和径流量分布情况 将各雨量站年降水量进行克里金插值,得到河源区年均降水量空间分布栅格图,以土地利用类型为基准,依据 budyko 假设计算沁河源区实际蒸散发,利用 SCS-CN 模型,进行相应的栅格运算,得到沁河源区径流量分布情况,各因子空间分布特征见图 2。

降水分布总体上自西北向东南减少,区域内年均降水在 400 mm 以上,属半湿润地区,区域内降水差值不大,最大与最小年降雨量相差 73.80 mm。蒸散发量和径流量的分布与降水量和土地利用类型有关,就不同土地利用类型的蒸散发而言,由于研究区内林地茂盛,覆盖度在 60% 以上,蒸散发量较大,且东南区域降水较大,该区域的蒸散发相对较大;建设用地的蒸散发较小,研究区内最大与最小蒸散发量相差 13.32 mm。由于本文在计算林地水源涵养量时不考虑产流量的影响,所以林地所在区域的产流量为 0;建设用地不透水面积大,透水性差,产流多。

3.1.2 沁河源区水源涵养功能空间分布特征 基于 budyko 假设和 SCS-CN 模型,利用水量平衡法,得到栅格分布式的沁河源区水源涵养量,结果见图 3。沁

河源区多年平均水源涵养量为 306.48 mm, 占年均降水量的 60.18%, 水源涵养总量达到 4.19 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, 最高值达到 487.87 mm, 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。

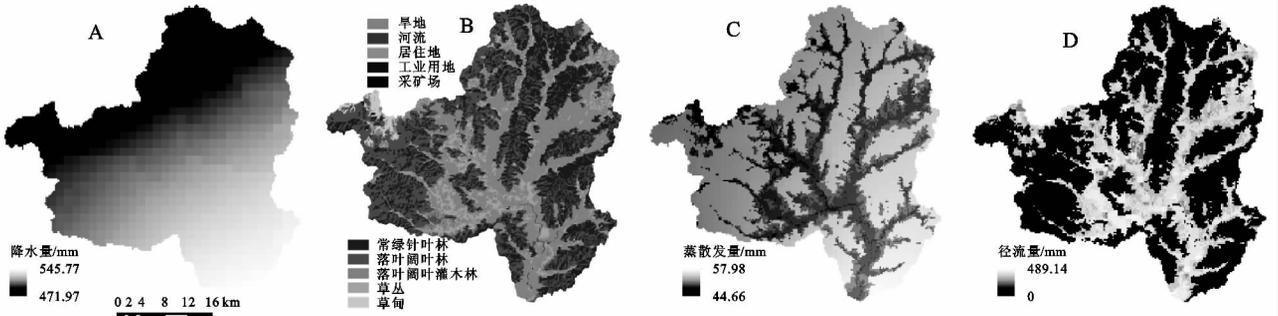


图 2 沁河源区降水量、土地利用类型、蒸散发量和径流量分布

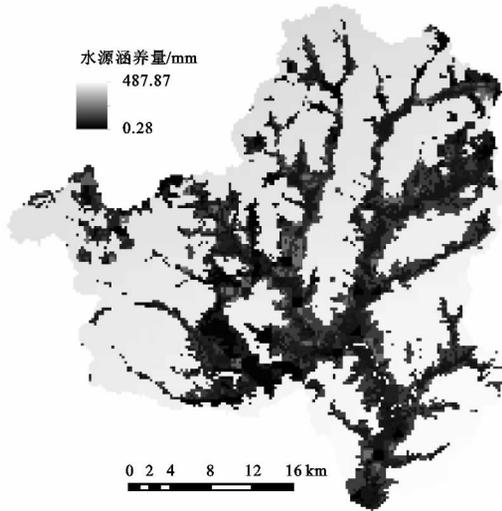


图 3 沁河源区水源涵养功能

3.2 沁河源区不同土地利用类型水源涵养功能特征

统计研究区内不同土地利用类型下的水源涵养量均值、面积比例及贡献率(各土地利用类型水源涵养量占总水源涵养量的比例), 见图 4。研究区内林地的面积最大, 占研究区总面积的 75.40%, 包括落叶阔叶林、常绿针叶林和落叶阔叶灌木林, 这三种林地的面积分别为 424.76 km^2 , 397.95 km^2 , 202.94 km^2 , 占总面积的 31.23%, 29.26% 和 14.92%; 其次为旱地 (190.97 km^2), 占总面积的 14.04%; 草地面积次之, 包括草丛 (106.25 km^2) 和草甸 (15.26 km^2); 建设用地和河流的面积最小, 仅占总面积的 1.52% 和 0.11%。

不同土地利用类型的水源涵养量均值依次为常绿针叶林 (364.53 mm) > 落叶阔叶林 (330.41 mm) > 草甸 (185.92 mm) > 河流 (178.01 mm) > 落叶阔叶灌木林 (173.58 mm) > 草丛 (142.98 mm) > 旱地

(138.36 mm) > 居住地 (91.39 mm) > 采矿场 (71.39 mm) > 工业用地 (52.73 mm)。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^[18], 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; 枯落物截留量一般是阔叶林 > 针叶林^[19]; 林分间土壤渗透性存在一定差异, 研究区内针叶林和阔叶林的土壤以粉砂壤土和壤土为主, 渗透性较强。研究区内的草甸是山西屈指可数的典型亚高山草甸之一, 主要生长着矮草类高山植物, 与草丛相比, 植被茂盛且覆盖度高, 水源涵养能力相对较好。

各土地利用类型水源涵养贡献率与水源涵养量和面积有关。研究区内的水源涵养主要由落叶阔叶林和常绿针叶林所贡献, 两者的贡献率分别为 43.99% 和 42.00%, 落叶阔叶林的贡献率稍大主要由于其面积最大所致。

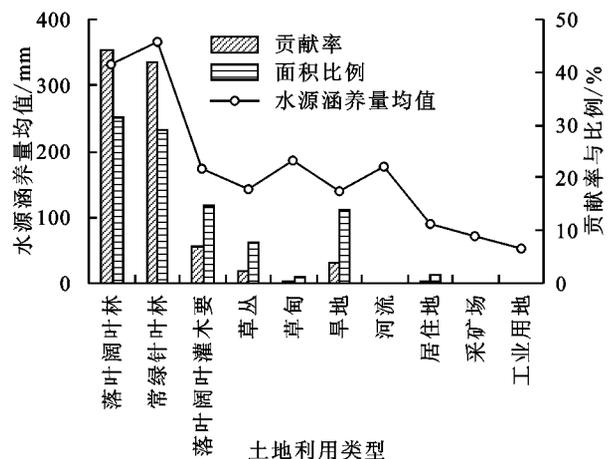


图 4 不同土地利用类型水源涵养功能特征

3.3 沁河源区不同海拔高度水源涵养功能特征

统计研究区在海拔高度 $<1\ 000\text{ m}$, $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$, $1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$, $2\ 000\sim 2\ 500\text{ m}$ 四个类别下的水源涵养量均值、面积比例及贡献率(图 5)。研究区内海拔 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 的面积比例为 73.25% , $1\ 000\text{ m}$ 以下的较少,只有 0.05% 。研究区内水源涵养功能主要来自于海拔 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 地区,其贡献率达到 66.12% ,其次来自于海拔 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$ 地区,贡献率为 29.23% ,位于海拔 $2\ 000\sim 2\ 500\text{ m}$ 和 $1\ 000\text{ m}$ 以下的水源涵养功能贡献率较低,分别为 4.65% 和 0.01% 。不同海拔高度上的水源涵养量均值不同,位于海拔 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$ 上的林地面积较大,其水源涵养量均值最大,为 401.71 mm ,其次为位于海拔 $2\ 000\sim 2\ 500\text{ m}$ 和 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 地区,均值分别为 312.73 mm 和 280.10 mm ,位于海拔 $1\ 000\text{ m}$ 以下的水源涵养能力最低,为 52.80 mm 。可见,海拔 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 地区贡献率最高主要受其面积较大的影响,海拔 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$ 地区贡献率较高与水源涵养量和面积均较高有关。

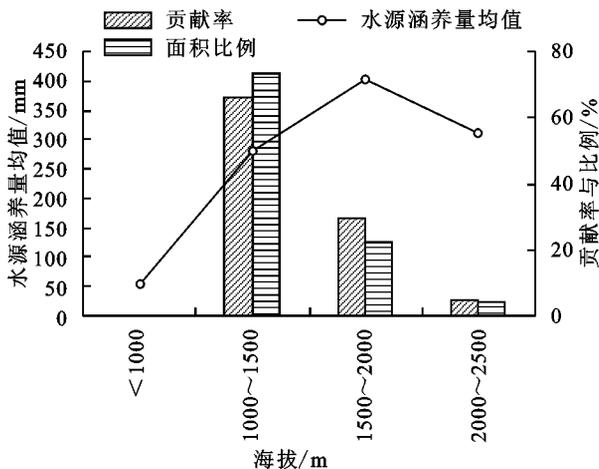


图 5 不同海拔高度水源涵养功能特征

3.4 沁河源区不同坡度水源涵养功能特征

根据不同的坡度,可分为平坡(5° 以下)、缓坡($5^\circ\sim 15^\circ$)、斜坡($15^\circ\sim 25^\circ$)、陡坡($25^\circ\sim 35^\circ$)、急坡($35^\circ\sim 45^\circ$)和险坡(45° 以上)六大类。统计研究区内不同坡度类型下的水源涵养量均值、面积比例及贡献率,见图 6。研究区内以缓坡和斜坡为主,急坡和险坡较少, 94.32% 的地面坡度小于 25° 。各坡度类型水源涵养贡献率依次为缓坡(48.36%) $>$ 斜坡(38.16%) $>$ 平坡(6.53%) $>$ 陡坡(6.46%) $>$ 急坡(0.48%) $>$ 险坡(0.02%),大小与水源涵养量和面积有关。对于水源涵养量均值,急坡、陡坡和险坡的最大,分别为 373.62 mm , 368.32 mm 和 363.94 mm ,这三种坡度上主要分布着落叶阔叶林和常绿针叶林,因此水源涵养功能较高;其次为斜坡和缓坡,水源涵养量均值为

344.73 mm 和 290.46 mm ;平坡的最小,为 183.34 mm ;建设用地主要分布在此坡段上,以致水源涵养能力较低。对于水源涵养贡献率,缓坡因其面积比重最大,其水源涵养贡献率仍高于其他坡地,斜坡的水源涵养量和面积比重均较大,因而贡献率也较高,尽管其他坡度的水源涵养量并不低,但是由于面积比重较小,导致贡献率不高。

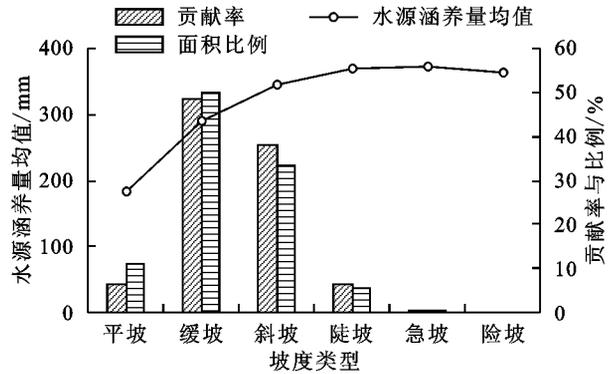


图 6 不同坡度类型水源涵养功能特征

4 结论

(1) 本文以沁河源区作为河源区典型区域,研究了沁河源区水源涵养功能空间分布特征。基于水量平衡法,依据 Budyko 假设和 SCS-CN 模型,计算得到沁河源区多年平均水源涵养量为 306.48 mm ,水源涵养总量达到 4.19 亿 m^3 。不同土地利用类型、海拔和坡度的水源涵养功能不同,其中落叶阔叶林和常绿针叶林的水源涵养贡献率和水源涵养量均值最大;海拔处于 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ m}$ 的水源涵养功能贡献率最大,海拔处于 $1\ 500\sim 2\ 000\text{ m}$ 的水源涵养量均值最大;缓坡和斜坡水源涵养贡献率较大,急坡、陡坡和险坡上,植被盖度高,水源涵养功能较高。

(2) 本文在水量平衡法计算中,基于 Budyko 假设原理计算地表实际蒸散发,利用 SCS-CN 模型计算地表产流量,结果基本可以反映该区水源涵养空间分布特征。但是由于参数的选择是依据国内相关文献,与研究区实际情况可能存在一定误差,参数的验证与改进可以进一步讨论。

(3) “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,对河源区的保护程度直接影响中下游以致整个流域范围的生态环境的好坏,与周边城市乡村的生产、生活与经济可持续发展有密切关系。对河源区水源涵养服务功能的评价过程是生态保护的基础工作,因此,探讨计算专门适用于河源区水源涵养功能的研究方法,使研究结果更具科学性,是今后逐步研究的重点。

参考文献:

- [1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [2] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002,41(3):393-408.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Policy Response, Findings of the Responses Working Group* [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [4] 刘青. 江河源区生态系统服务价值与生态补偿机制研究:以江西东江源为例[D]. 南昌:南昌大学,2007.
- [5] 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.
- [6] 赖敏,吴绍洪,尹云鹤,等. 三江源基于生态服务价值的生态补偿额度[J]. *生态学报*,2015,35(2):227-236.
- [7] 张彪,李文华,谢高地,等. 北京市森林生态系统的水源涵养功能[J]. *生态学报*,2008,28(11):5619-5624.
- [8] 余新晓,秦永胜,陈丽华,等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. *生态学报*,2002,22(5):783-786.
- [9] 张海博. 基于 SEBS 与 SCS 模型的区域水源涵养量估算研究:以北京北部山区为例[D]. 北京:中国环境科学研究院,2012.
- [10] 聂忆黄. 基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究[J]. *地学前缘*,2010,17(3):269-275.
- [11] 张丹,梁康,聂茸等. 基于 Budyko 假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析[J]. *资源科学*,2016,38(6):1140-1147.
- [12] Zhang L, Dawes W R, Wslker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation change at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001,37(3):701-708.
- [13] 杜加强,熊珊珊,刘成程,等. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. *干旱区地理*,2013,36(5):831-839.
- [14] 符素华,王红叶,王向亮,等. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J]. *地理研究*,2013,32(5):797-807.
- [15] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS 模型及其研究进展[J]. *水土保持研究*,2010,17(2):120-124.
- [16] 董文涛,程先富,张群,等. SCS-CN 模型在巢湖流域地表产流估算中的应用[J]. *水土保持通报*,2012,32(3):174-177.
- [17] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. *干旱区地理*,2012,35(3):415-420.
- [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*,2013,22(3):451-457.
- [19] 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] Masiello C A, Chadwick O A, Southon J, et al. Weathering controls on mechanisms of carbon storage in grassland soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004,18(4):449-460.
- [17] Bakker E S, Ritchie M E, Olf H, et al. Herbivore impact on grassland plant diversity depends on habitat productivity and herbivore size. [J]. *Ecology Letters*, 2006,9(7):780-789.
- [18] Gustavsson E, Lennartsson T, Emanuelsson M. Land use more than 200 years ago explains current grassland plant diversity in a Swedish agricultural landscape[J]. *Biological Conservation*, 2007,138(1/2):47-59.
- [19] 段敏杰. 放牧干扰下藏北紫花针茅高寒草地生物量遥感监测[D]. 北京:中国农业科学院,2011.
- [20] 董全民,赵新全,马玉寿,等. 放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响[J]. *草地学报*,2012,20(1):10-16.
- [21] An Hui, Li Guoqi. Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2013,19(3):705-712.
- [22] May F, Grimm V, Jeltsch F. Reversed effects of grazing on plant diversity: The role of below-ground competition and size symmetry [J]. *Oikos*, 2009,118(12):1830-1843.
- [23] 刘艳红,赵惠勋. 干扰与物种多样性维持理论研究进展[J]. *北京林业大学学报*,2000,22(4):101-105.
- [24] Gang C, Zhang J, Li J. The Advances in the carbon source/sink researches of typical grassland ecosystem in china[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011,10:1646-1653.
- [25] Xiong D, Shi P, Sun Y, et al. Effects of grazing exclusion on plant productivity and soil carbon, nitrogen storage in alpine meadows in northern tibet, china[J]. *Chinese Geographical Science*, 2014,24(4):488-498.
- [26] Frank D A, Mcnaughton S J, Tracy B F. The Ecology of the Earth's Grazing Ecosystems [J]. *BioScience*, 1998,48(7):513-521.
- [27] 李怡,韩国栋. 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响[J]. *内蒙古农业大学学报:自然科学版*,2011,32(2):89-92.

(上接第 146 页)