

# 紫色土区小流域土壤保持服务功能的空间分布特征

陆传豪, 代富强, 周启刚

(重庆工商大学 旅游与国土资源学院, 重庆 400067)

**摘要:** [目的] 分析不同坡度、土壤类型、土地利用下的土壤保持服务功能分布, 为减少土壤流失和改进土地利用规划提供科学依据。[方法] 结合修正通用土壤流失方程(RUSLE)和 GIS 技术, 以曲水河小流域为典型研究区, 基于 DEM、土壤、土地利用等基础数据, 分析了研究区土壤保持服务功能的分布现状及影响因素。[结果] (1) 该流域土壤保持总量为  $1.10 \times 10^7$  t/a, 单位面积土壤保持量为  $384.74$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 具有较高的生态系统服务功能重要性; (2) 土壤保持服务功能总体呈现从河谷阶地逐渐向周边丘陵坡地递增的空间分布特征; (3) 强烈及以上侵蚀强度区、 $8^\circ \sim 25^\circ$  的坡度区、耕地、钙质紫泥田区和红棕紫泥土区应为土壤保持工作的热点区域。[结论] 不同坡度、土壤类型、土地利用类型下土壤保持服务功能差异显著, 可以通过改良土壤、提高植被覆盖和采取土壤侵蚀防治措施提高土壤保持服务功能水平。

**关键词:** 土壤保持; 生态系统服务; 空间分布; 影响因素; 紫色土区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0308-07

中图分类号: F062.2

文献参数: 陆传豪, 代富强, 周启刚. 紫色土区小流域土壤保持服务功能的空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 308-314. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.055

## Spatial Distribution Characteristics of Soil Conservation Service in Small Watershed of Purplish Soil Region

LU Chuanhao, DAI Fuqiang, ZHOU Qigang

(College of Tourism and Land Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** [Objective] The study analyzed soil conservation service among different slopes, soil types, and land use types in order to provide support to soil conservation and land-use planning. [Methods] In this study, DEM, soil map and land use map was used, revised universal soil loss equation (RUSLE) and GIS method was employed to investigate the spatial distribution characteristics of soil conservation service and its influence factors in Qushui river small watershed. [Results] (1) The total soil conservation capacity was  $1.10 \times 10^7$  t/a, while mean soil conservation capacity was  $384.74$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ) with the high importance of ecosystem services. (2) In addition, spatial distribution of soil conservation service exhibited a successive increase from river terrace to slope area. (3) Intensive erosion area, sloping area ( $8^\circ \sim 25^\circ$ ), arable land, calcic purplish soil and red-brown purplish soil region were the hot spot for soil conservation. [Conclusion] Significant differences in soil conservation service exist among different slopes, soil types, and land use types. Soil conservation service can be improved by improving soil condition, increasing vegetation cover, and adopting soil erosion control measures.

**Keywords:** soil conservation; ecosystem services; spatial distribution; influence factor; purplish soil region

土壤侵蚀是中国面临的主要环境问题之一, 不仅造成土壤退化、河流水质下降、泥沙淤积、洪涝灾害加剧, 也严重影响区域农业生产和农村可持续发展。土

壤保持服务功能是生态系统的重要服务功能之一, 在减少土壤流失和维持土地生产力中起着重要作用。目前, 土壤保持服务功能及其价值评估已引起生态

收稿日期: 2015-01-26

修回日期: 2015-03-09

资助项目: 重庆工商大学科研启动项目“基于 InVEST 模型的三峡水库生态屏障区生态系统服务功能空间评价”(2013-56-05); 国家自然科学基金项目“雅鲁藏布江河谷区农户种植生计下耕地土壤肥力质量的时空变化特征”(41301351); 重庆市教委科技项目“三峡库区坡耕地适宜水土保持措施空间优化配置研究”(KJ130724)

第一作者: 陆传豪(1988—), 男(汉族), 浙江省诸暨市人, 硕士研究生, 研究方向为生态评价与规划。E-mail: luch1988@foxmail.com。

通讯作者: 代富强(1980—), 男(汉族), 四川省都江堰市人, 博士, 副教授, 主要从事生态评价、土壤侵蚀与水土保持、区域可持续发展研究。E-mail: daifq@ctbu.edu.cn。

学、水土保持学以及土壤学相关学者的广泛关注,在基础理论与实践应用方面取得显著研究成果。

国外土壤保持研究始于 19 世纪后期的德国,初期主要以定性描述和统计分析为主。1965 年, Wischmeier 等<sup>[1]</sup>正式提出通用土壤流失方程(USLE),为土壤流失定量预测提供了有效的模型方法。随后, Renard 等<sup>[2]</sup>提出修正通用土壤流失方程(RUSLE),该模型与地理信息系统(GIS)、遥感(RS)等空间信息技术相结合,广泛应用于土壤保持服务功能评价中<sup>[3]</sup>。近年来,有学者开发基于 GIS 平台的生态系统服务协同与竞争模型(InVEST)<sup>[4]</sup>,其中的土壤保持等模块已经在美国等地区得到应用和验证<sup>[5-6]</sup>。在国内,许多学者对 USLE 模型的参数和适用性进行了研究,并将其与 GIS 结合在土壤保持服务功能评价等方面进行了实践应用<sup>[7-8]</sup>。此外, InVEST 模型被引入国内以来,不同学者利用其土壤保持模块对海南岛<sup>[8]</sup>、北京山区<sup>[9]</sup>、密云水库流域<sup>[10]</sup>等地区的土壤保持服务功能进行了评价。但是,目前紫色土区的相关研究还是以土壤侵蚀为主<sup>[11-12]</sup>,土壤保持服务功能评价还少有报道。

本文选择四川省紫色土区的曲水河小流域为研究区,结合 GIS 技术和修正通用土壤流失方程评价该区的土壤保持服务功能及其空间分布特征,并分析坡度、土壤类型、土地利用类型对土壤保持服务功能的影响,以期对紫色土区水土流失防治和生态系统管理提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区是位于嘉陵江中游西岸四川省南充市的曲水河小流域,流域总面积 286 km<sup>2</sup>。该流域为典型的紫色土丘陵区,土壤以红棕紫泥土和棕紫泥土为主,土层较厚,土壤发育微弱,呈微碱性,土壤养分较为丰富,质地多为壤质黏土,保水性能差,易产生水土流失<sup>[13]</sup>。流域内出露岩层主要为侏罗系中、上统内陆湖碎屑岩沉积,其次为第四系更新统,全新统松散沉积物,不整合与侏罗系岩层之上。流域地貌以丘陵为主,地势由西北向东南逐渐降低,最高海拔 512 m,最低海拔 238 m。流域属中亚热带温暖湿润气候区,季风气候显著,四季分明,降雨量季节分布不均,热量丰富,无霜期长,适宜多种作物生长。年平均气温为 17.4 °C,年平均降雨量为 1 010.6 mm。流域内自然植被较差,多为人工种植的乔木和灌木,其中乔木以柏树(*Cupressus funebris*)和桤木(*Alnus cremastogyne*)为主,灌木以黄荆(*Vitex negundo*)和马桑(*Coriaria nepalensis*)为主。土地利用以耕地和林地为主,

由于长期存在顺坡耕作等不合理的土地利用方式,水土流失和土地退化问题严重。

## 2 方法与数据

### 2.1 土壤保持服务功能评价模型

本研究依托 GIS 平台,采用修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)计算曲水河小流域土壤保持量。该模型具有较强的适用性和可操作性,已经在各个地区的土壤流失评价中得到广泛应用。模型基本公式为:

$$A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:  $A$ ——年平均土壤侵蚀量 [t/(hm<sup>2</sup> · a)];  $R$ ——降雨侵蚀力因子 [(MJ · mm)/(hm<sup>2</sup> · h · a)];  $K$ ——土壤可蚀性因子 [t · h · hm<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup> · MJ · mm)];  $LS$ ——地形因子,包括坡长因子  $L$  和坡度因子  $S$ ;  $C$ ——植被覆盖与管理因子;  $P$ ——水土保持措施因子。其中,降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子和地形因子为自然因子,与人类活动关联度相对较小;植被覆盖与管理因子和水土保持措施因子则受自然因素与人类行为的共同影响<sup>[14]</sup>。

土壤保持服务功能以土壤保持量( $A_c$ )来表示,为潜在土壤侵蚀量( $A_p$ )与现实土壤侵蚀量( $A_r$ )的差值。其中,潜在土壤侵蚀量是在假定没有地表植被覆盖和任何水土保持措施条件下的土壤侵蚀量,即  $C=1$  和  $p=1$ 。现实土壤侵蚀量指在有地表植被覆盖和采取一定水土保持措施情况下的土壤侵蚀量。土壤保持量的计算公式为:

$$A_c=A_p-A_r=R \cdot K \cdot LS \cdot (1-C \cdot P) \quad (2)$$

### 2.2 土壤侵蚀评价因子的确定

2.2.1 降水侵蚀力因子( $R$ )  $R$  因子是指由降水导致土壤侵蚀的潜力,主要取决于全年降雨量、降雨动能和降雨强度,是产生土壤侵蚀的主要因素。在考虑年降雨总量和年内分布的情况下,采用基于月尺度降雨量数据的  $R$  值计算经验公式<sup>[15]</sup>:

$$R=\sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5 \lg(P_i^2/P)-0.08188} \quad (3)$$

式中:  $P_i$ ——月降雨量(mm);  $P$ ——降雨量(mm)。在不考虑降雨空间差异的情况下,利用公式(3)计算研究区历年的  $R$  值,然后将年平均值赋予该区每个栅格,生成  $R$  值图。

2.2.2 土壤可蚀性因子( $K$ )  $K$  因子代表不同土壤类型的易受侵蚀程度,本质上反映了不同类型土壤颗粒被水力分离和搬运的难易度以及土壤本身抵抗侵蚀能力的强弱程度。本研究采用 EPIC 模型中提出的  $K$  值估算方法<sup>[16]</sup>,其公式如下:

$$K = [0.2 + 0.3e^{-0.0256S_d(1-S_i/100)}] \times [S_i/(C_i + S_i)]^{0.3} \times [1 - 0.25C/(C + e^{3.72-2.95C})] \times [1 - 0.7(1-S_d/100)/(1-S_d/100 + e^{-5.51+22.9(1-S_d/100)})] \quad (4)$$

式中： $S_d$ ——砂粒含量(%)； $S_i$ ——粉粒含量(%)； $C_i$ ——黏粒含量(%)； $C$ ——有机碳含量(%)。 $K$ 因子计算结果通过除以 7.59 转换为国际制单位。基于研究区各土壤类型的属性值，利用公式(4)计算得到各土壤类型的  $K$  值，然后通过土壤类型图的栅格转化得到  $K$  值图。

2.2.3 地形因子( $LS$ )  $LS$  因子反映地形的坡长和坡度对土壤侵蚀的综合作用。在单个坡面，该因子值可以通过试验观测得到；在区域尺度，则基于数字高程模型(DEM)提取的坡长和坡度，采用经验公式计算获得。本研究  $LS$  因子的计算采用如下经验公式<sup>[17]</sup>：

$$L = (\lambda/22.13)^m \quad (5)$$

式中： $L$ ——坡长因子； $\lambda$ ——坡长(m)；参数  $m$  的取值为：坡度大于 5% 时为 0.5，坡度介于 3% 和 5% 之间时

为 0.4，坡度小于 3% 为 0.3。此外，根据 McCool 等<sup>[18]</sup>的研究结果， $L$  因子计算时设定坡长上限为 150 m。

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03 \quad (\theta < 9\%)$$

$$S = 16.8\sin\theta - 0.50 \quad (\theta \geq 9\%) \quad (6)$$

式中： $S$ ——坡度因子； $\theta$ ——坡度(%)。

基于研究区的 DEM 数据，通过 ArcGIS 的空间分析模块提取坡长和坡度，然后采用公式(5)和(6)计算得到  $L$  值图和  $S$  值图。

2.2.4 地表覆盖与管理因子( $C$ )  $C$  因子是侵蚀动力的抑制因子，其本质是反映地表植被覆盖状况对土壤侵蚀的抑制效果。根据研究区土地利用现状和农业经营情况，参考紫色土区  $C$  因子相关研究成果<sup>[18]</sup>，确定各土地利用类型的  $C$  因子值(表 1)，然后将土地利用类型图进行栅格转化得到  $C$  值图。

表 1 曲水河小流域不同土地利用类型的  $C$  和  $P$  因子值

因子值	旱地	水田	果园	茶园	其他园地	有林地	灌木林地
$C$	0.31	0.12	0.07	0.035	0.26	0.006	0.017
$P$	0.4	0.01	0.5	0.5	0.5	1	1

2.2.5 水土保持措施因子( $P$ )  $P$  因子定义为采取一定水土保持措施与顺坡种植的土壤流失量比值。实地调查发现，研究区的主要水土保持措施为等高耕作和水平梯田，结合花利忠等<sup>[12]</sup>和刘爱霞等<sup>[19]</sup>的研究结果，确定各土地利用类型的  $P$  因子值(表 1)，然后将土地利用类型图进行栅格转化得到  $P$  值图。

### 2.3 数据来源

研究区 1981—2010 年的年值和月值降雨量数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)；DEM 数据(30 m 分辨率)来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn/>)；土壤数据为基于第二次土壤普查结果的南充市 1:200 000 土壤类型图；土地利用数据为 2009 年南充市嘉陵区土地利用现状图。

## 3 结果与分析

### 3.1 曲水河小流域土壤侵蚀空间分布特征

3.1.1 潜在土壤侵蚀 根据公式(1)和公式(2)计算得到，曲水河小流域的平均潜在土壤侵蚀模数为 418.13 t/(hm<sup>2</sup>·a)，潜在土壤侵蚀总量为 1.20×10<sup>7</sup> t/a。如图 1 所示，曲水河及其支流的河谷地区潜在土壤侵蚀较弱，沿河谷两侧阶地向丘陵逐渐增加，侵

蚀最严重的区域主要分布在流域的北部、西部和东南部。不同坡度、土壤类型和土地利用类型条件下的潜在土壤侵蚀存在明显差异。

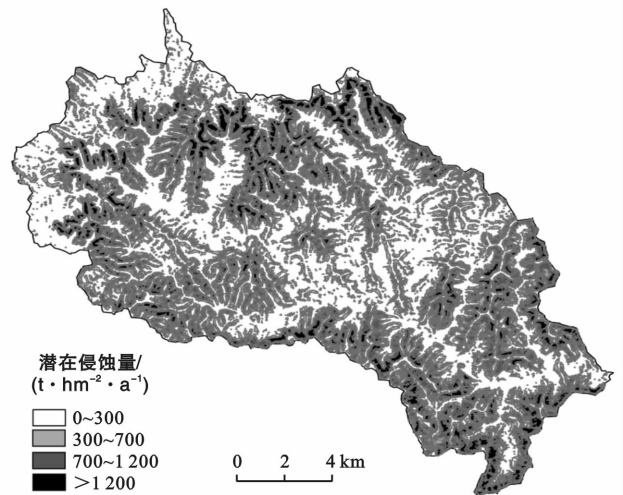


图 1 曲水河小流域潜在土壤侵蚀量空间分布

不同坡度区中，坡度介于 8°~25°之间的区域占全流域总面积的 47.27%，该区域潜在土壤侵蚀总量占全流域潜在土壤侵蚀总量的比例高达 76.63%，平均潜在土壤侵蚀模数为 677.73 t/(hm<sup>2</sup>·a)，成为产生潜在土壤侵蚀的最主要区域；此外，坡度介于 0°~8°之间的区域的平均潜在土壤侵蚀模数为 155.91 t/(hm<sup>2</sup>·a)，其

潜在土壤侵蚀总量占全流域潜在侵蚀总量的 19.23%;同时,由于坡度大于 25°区域的面积较小,虽然该区域平均潜在土壤侵蚀模数较大,但其潜在土壤侵蚀总量对全流域的贡献较小。不同土壤类型区中,红棕紫泥土区的潜在土壤侵蚀最为严重,其平均潜在土壤侵蚀模数达到 482.493 t/(hm<sup>2</sup>·a),潜在土壤侵蚀总量为 4.88×10<sup>6</sup> t/a,占全流域潜在侵蚀总量的 40.81%;此外,尽管钙质紫泥田区的平均潜在土壤侵蚀模数是研究区各土壤类型中最小的,但由于该区域占到全流域面积的 43.69%,其潜在土壤侵蚀总量占全流域总量的比例达 34.92%。不同土地利用类型区中,耕地面积占全流域面积的 84.16%,平均潜在土壤侵蚀模数为 383.68 t/(hm<sup>2</sup>·a),潜在土壤侵蚀总量占全流域侵蚀总量的 77.22%,是研究区主要的潜在土壤侵蚀来源;园地和林地的面积相对较小,潜在土壤侵蚀总量分别占侵蚀总量的 18.93%和 3.84%。

**3.1.2 现实土壤侵蚀** 现实土壤侵蚀量是在有植被覆盖和水土保持措施条件下的实际土壤侵蚀量,因此植被覆盖和水土保持措施能有效地削弱雨水对地表土壤造成的打击和冲刷,植物根系也能通过根系网的固土功能减少地表径流产生的土壤侵蚀<sup>[20]</sup>。根据公式(1)和(2)的计算得到,曲水河小流域的平均现实土壤侵蚀模数为 33.07 t/(hm<sup>2</sup>·a),现实土壤侵蚀总量为 9.57×10<sup>5</sup> t/a,明显低于潜在土壤侵蚀。如图 2 所示,曲水河小流域的现实土壤侵蚀量与潜在土壤侵蚀量呈现相似的空间分布特征,土壤侵蚀严重的地区主要分布在丘陵的坡地上,这些区域主要分布有大量坡耕地,地表植被较差,土壤侵蚀量较大。

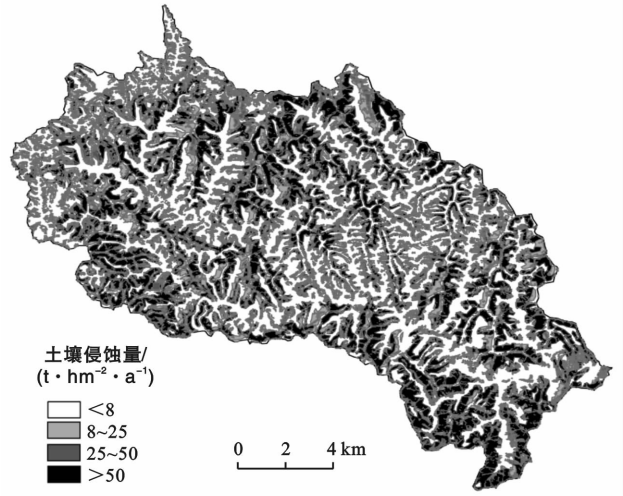


图 2 曲水河小流域现实土壤侵蚀量空间分布

根据《土壤侵蚀分类分级标准》,将现实土壤侵蚀模数分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈、剧烈 6 个等级。曲水河小流域的土壤母质以遂宁组为主,Liu 等<sup>[21]</sup>通过研究确定该母质紫色土的容许土壤流失量为 8 t/(hm<sup>2</sup>·a),因此把该值作为微度土壤侵蚀的分级标准。结果显示(表 2),微度侵蚀区的面积为 10 488.15 hm<sup>2</sup>,占流域总面积的 36.25%,平均土壤侵蚀模数为 2.08 t/(hm<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量占全流域侵蚀总量的 2.28%;侵蚀强度最大的剧烈侵蚀区的面积为 712.35 hm<sup>2</sup>,仅占总面积的 2.46%,平均土壤侵蚀模数达 182.38 t/(hm<sup>2</sup>·a),侵蚀总量占流域总量的 13.58%;此外,土壤侵蚀总量最大的为极强烈侵蚀区,虽然该区只占流域总面积的 10.93%,但是其平均土壤侵蚀模数仅次于剧烈侵蚀区,达 108.17 t/(hm<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量占全流域总量的 35.74%,所占比例明显高于其他区域。

表 2 曲水河小流域现实土壤侵蚀强度分级

侵蚀强度/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	分级	面积/hm <sup>2</sup>	面积比例/ %	平均土壤侵蚀模数/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤侵蚀总量/ (10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	侵蚀量 比例/%
<8	微度	10 488.15	36.25	2.08	2.18	2.28
8~25	轻度	7 033.14	24.31	15.46	10.87	11.36
25~50	中度	4 545.63	15.71	36.02	16.37	17.11
50~80	强烈	2 992.41	10.34	63.73	19.07	19.93
80~150	极强烈	3 160.98	10.93	108.17	34.19	35.74
>150	剧烈	712.35	2.46	182.38	12.99	13.58

不同土壤类型区中,棕紫泥土区和红棕紫泥土区的平均现实土壤侵蚀模数分别为 40.99 和 40.11 t/(hm<sup>2</sup>·a),远高于钙质紫泥田区;同时,二者面积占全流域面积的 56.31%,其现实土壤侵蚀总量也高于钙质紫泥田区。不同坡度区中,坡度介于 8°~15°和 15°~25°的区域仍是土壤侵蚀最严重的地区,平均现

实土壤侵蚀模数分别为 43.85 和 82.78 t/(hm<sup>2</sup>·a),土壤侵蚀总量合计占到全流域侵蚀总量的 77.68%。在不同土地利用类型区中,由于研究区坡耕地分布广泛,耕地的平均现实土壤侵蚀模数和侵蚀总量都明显高于林地和园地,成为该区人地矛盾最突出的区域。

### 3.2 曲水河小流域土壤保持服务功能空间分布特征

曲水河小流域土壤保持总量为  $1.10 \times 10^7$  t/a, 平均单位面积土壤保持量为  $384.74$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )。如图3所示, 曲水河小流域土壤保持量空间分布呈现明显的地带分布特征, 流域西北部和东南部较高, 地势平坦的河谷阶地单位面积土壤保持量较小, 丘陵坡地区域较大, 总体上随着坡度的增大而变大。这一特征主要归因于丘陵坡地坡度较大且主要为耕地, 潜在土壤侵蚀量明显高于其他区域, 同时植被覆盖和水土保持措施则可以显著减低现实土壤侵蚀量。此外, 研究区微度和轻度侵蚀区的面积占流域总面积的 60.56%, 而极强烈和剧烈区分别占 10.93% 和 2.46%。按照侵蚀面积从大到小排列依次为: 微度 > 轻度 > 中度 > 极强烈 > 强烈 > 剧烈。同时, 研究区 69.25% 的侵蚀量来自占流域总面积 23.73% 的强烈以上侵蚀区域, 该类区域应作为今后土壤保持服务功能提升的重点区域。

### 3.3 曲水河小流域土壤保持服务功能的影响因素

#### 3.3.1 不同坡度条件下的土壤保持服务功能特征

坡度是决定土壤保持服务功能的关键因子之一, 对抑制地表径流的侵蚀能力和持留土壤能力有重要影响。

在植被覆盖、土壤抗蚀性等条件相近的情况下, 坡度的增加会导致地表径流量和土壤侵蚀量的显著增加<sup>[22]</sup>。为评价不同坡度条件下的土壤保持服务功能分布规律, 依据相关研究成果和研究区实际, 将研究区土壤保持服务功能按坡度等级划分为 6 个级别(表 3)。

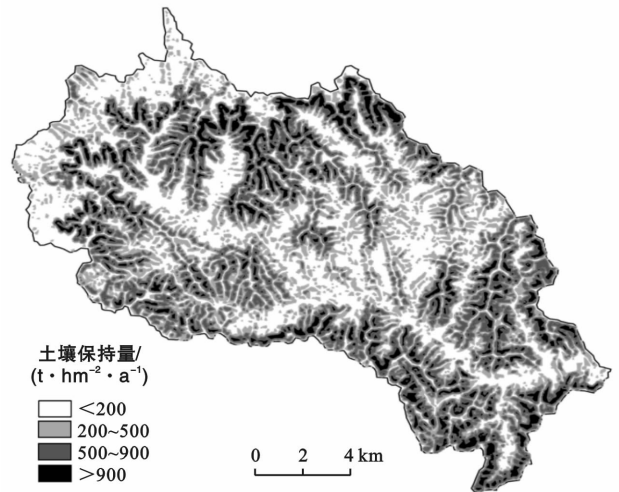


图3 曲水河小流域土壤保持服务功能空间分布

表3 曲水河小流域不同坡度土壤保持服务功能

侵蚀强度/(°)	面积/ $\text{hm}^2$	面积比例/ %	单位面积土壤保持量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	土壤保持总量/ ( $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ )	保持量比例/ %
<5	9 064.44	31.67	97.65	88.51	8.04
5~8	5 699.61	19.91	222.39	126.75	11.51
8~15	9 218.43	32.21	491.39	452.99	41.13
15~25	4 312.71	15.07	899.53	387.94	35.23
25~35	321.12	1.12	1 366.15	43.87	3.98
>35	7.29	0.03	1 647.06	1.20	0.11

结果表明, 坡度小于  $5^\circ$  的区域面积为 9 064.44  $\text{hm}^2$ , 占全流域面积的 31.67%, 其单位面积土壤保持量为  $97.65$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 土壤保持总量为  $8.851 \times 10^5$  t/a, 仅占全流域保持总量的 8.04%。该区域虽然面积较大, 但由于坡度小, 土壤侵蚀量和保持量都较低。随着坡度增加, 土壤侵蚀强度不断上升, 而地表植被覆盖的降雨截留能力和土壤固结能力也不断增强<sup>[23]</sup>, 使得单位面积土壤保持量快速增加。在坡度介于  $8^\circ \sim 15^\circ$  的区域, 单位面积土壤保持量增加到  $491.39$  t/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 加之该区域面积占全流域总面积的 32.21%, 土壤保持总量达到  $452.99$  t/a, 占流域总保持量的 41.13%, 是研究区土壤保持量最大的坡度区域。而坡度介于  $15^\circ \sim 25^\circ$  的区域, 土壤保持总量占全流域保持总量的比例也高达 35.23%。坡度在  $25^\circ$  以上的区域, 由于其面积较小, 土壤保持总量也较小。

总的来看, 随着坡度的增加, 土壤侵蚀强度也不断增大, 同时植被和水土保持措施等对土壤侵蚀的抑制作用也不断增强, 使得单位面积土壤保持量不断提升。

值得注意的是, 曲水河小流域的土壤侵蚀量和土壤保持量都主要集中在  $8^\circ \sim 15^\circ$  和  $15^\circ \sim 25^\circ$  的坡度区域。一方面,  $8^\circ \sim 15^\circ$  区域的土壤侵蚀量占侵蚀总量的 42.31%,  $15^\circ \sim 25^\circ$  区域占 37.37%, 远大于其他坡度区域, 成为土壤侵蚀的主要发生区; 另一方面, 这两个区域的土壤保持量共占全流域保持量的 76.36%。结果表明, 研究区今后的水土保持工作重点应放在这两个坡度区域, 可以通过采取退耕还林、坡改梯等措施, 降低现实土壤土壤侵蚀量, 提高土壤保持服务功能。

3.3.2 不同土壤类型条件下的土壤保持服务功能特征 土壤抗蚀性是土壤自身抵抗自然和人为作用力对其破坏和剥蚀的能力, 是降低土壤侵蚀强度和提

土壤保持能力的内在因素,主要取决于土壤的质地、结构、有机质含量和团聚体等<sup>[24]</sup>。分析不同土壤类型条件下的土壤保持服务功能特征,有助于提升曲水河小流域的土壤抗蚀能力。

曲水河小流域钙质紫泥田、棕紫泥土和红棕紫泥土 3 种土壤类型区的面积比例分别为 43.69%、20.95%和 35.36%。如表 4 所示,钙质紫泥田区的单位面积土壤保持量最低,为 309.89 t/(hm<sup>2</sup>·a),棕紫泥土区和红棕紫泥土区的相对较高,分别为 443.59 和 442.38 t/(hm<sup>2</sup>·a);红棕紫泥土区的土壤保持总量最大,为 4.48×10<sup>6</sup> t/a,其次为钙质紫泥田区和棕

紫泥土区。结果表明,棕紫泥土区和红棕紫泥土区的土壤保持服务功能明显强于钙质紫泥田区。棕紫泥土区面积最小,而单位面积土壤保持量最大;红棕紫泥土区的土壤保持总量和侵蚀总量均较高,分别占全流域总量的 40.66%和 42.50%;同时,虽然钙质紫泥田区的面积最大,占总面积的 43.69%,但其单位面积土壤保持量最低,土壤保持总量只占全流域总量的 35.19%。因此,钙质紫泥田区是研究区下一步水土保持的重点区域,可以通过提高植被覆盖、改善土壤性质、增强土壤抗蚀性等方法来提高其土壤保持服务功能。

表 4 曲水河小流域不同土壤类型土壤保持服务功能

土壤类型	面积/hm <sup>2</sup>	面积比例/ %	单位面积土壤保持量/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤保持总量/ (10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	保持量比例/ %
钙质紫泥田	12 504.96	43.69	309.89	387.51	35.19
棕紫泥土	5 995.26	20.95	443.59	265.95	24.15
红棕紫泥土	10 122.3	35.36	442.38	447.79	40.66

3.3.3 不同土地利用类型条件下的土壤保持服务功能特征 土地利用类型影响土壤的基本特性,改变降雨对地表的作用过程,缓解或加剧降雨对土壤颗粒的剥离和搬运的作用效果。在土壤侵蚀防治过程中,可以通过改变土地利用类型和提高植被覆盖来增强生态系统的土壤保持服务功能。与土壤改良和坡改梯等方法相比,退耕还林和退耕还草通过改变土地利用类型取得了更高的保水保土效果和社会经济效益,已成为中国一项广泛实施且有效的土地管理政策。研究不同土地利用类型条件下的土壤保持服务功能特征,可为土地资源管理和水土保持规划提供科学依据。

如表 5 所示,耕地是曲水河小流域的主要土地利用类型,面积为 24 088.32 hm<sup>2</sup>,占全流域面积的比例达 84.16%,其次是园地和林地,分别为 11.54%和 4.30%。园地的单位面积土壤保持量最大,为 665.60

t/(hm<sup>2</sup>·a),林地和耕地次之,分别为 362.96 和 347.34 t/(hm<sup>2</sup>·a)。这主要归因于研究区的园地大都分布于坡度较大、土壤可蚀性强的区域,导致其潜在土壤侵蚀量较大。由于相对较大的面积分布,耕地成为研究区土壤保持总量最高的土地利用类型区,土壤保持总量为 8.37×10<sup>6</sup> t/a,占全流域保持总量的 75.97%。研究发现,耕地既是研究区潜在土壤侵蚀总量和现实土壤侵蚀总量最大的区域,也是土壤保持总量最大的区域,而其单位面积土壤保持量较小,说明耕地具有较大的土壤侵蚀风险,只有通过采取适宜的水土保持措施或者改变土地利用类型才能提高其土壤保持服务功能。同时,研究区园地的单位面积土壤保持量较大,可以通过种植保水保土效果较好的经济作物,既可以提高研究区的土壤保持服务功能,又能增加农民收入。

表 5 曲水河小流域不同土地利用类型土壤保持服务功能

土地类型	面积/hm <sup>2</sup>	面积比例/ %	单位面积土壤保持量/ (t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	土壤保持总量/ (10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	保持量比例/ %
耕地	24 088.32	84.16	347.34	836.67	75.97
园地	3 303.72	11.54	665.60	219.90	19.97
林地	1 231.29	4.30	362.96	44.69	4.06

## 4 结论

(1) 曲水河小流域的平均现实土壤侵蚀强度属中度侵蚀强度水平,远低于潜在土壤侵蚀强度,说明该区具有较高的生态系统服务功能重要性。

(2) 曲水河小流域的土壤保持总量为 1.10×10<sup>7</sup>

t/a,单位面积土壤保持量为 384.74 t/(hm<sup>2</sup>·a),总体呈现从河谷阶地逐渐向周边丘陵坡地递增的空间分布特征。

(3) 不同坡度区,单位面积土壤保持量随着坡度的增加而增加,且 76.36%的土壤保持量来自 8°~25°的坡度区;不同土壤类型区,棕紫泥土区和红棕紫泥

土区的单位面积土壤保持量远大于钙质紫泥田,并且红棕紫泥土区为土壤保持总量最大的区域,占到全流域总量的 40.66%;不同土地利用类型区,园地的单位面积土壤保持量最大,为 665.60 t/(hm<sup>2</sup>·a),林地次之,耕地最小,同时由于耕地面积比例最大,使其成为土壤保持总量贡献最大的土地利用类型区。

总体来看,曲水河小流域的土壤侵蚀量和土壤保持量均集中在强烈及以上侵蚀强度区、8°~25°的坡度区、耕地、钙质紫泥田区和红棕紫泥土区,以上地区均为曲水小流域今后进行生态恢复和土壤侵蚀治理的重点区域,可以通过土地改良增强土壤抗蚀性和采取退耕还林还草、坡改梯等措施提高该区的土壤保持服务功能水平。

#### [参 考 文 献]

- [1] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning [M]. Washington, D C: U. S. Department of Agriculture, 1978.
- [2] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: Revised universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(1):30-33.
- [3] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [4] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. 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.
- [5] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013,16(5):6-18.
- [6] Polasky S, Nelson E, Pennington D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota [J]. Environmental & Resource Economics, 2011,48(2):219-242.
- [7] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [8] 饶恩明,肖焱,欧阳志云,等.海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J].生态学报,2013,33(3):746-755.
- [9] 周彬,余新晓,陈丽华,等.基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J].水土保持研究,2010,17(6):9-13.
- [10] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
- [11] 尹忠东,左长清,苟江涛,等.川中紫色土区小流域土地利用与土壤流失关系[J].水利学报,2011,42(3):329-336.
- [12] 花利忠,贺秀斌,朱波.川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究[J].水土保持通报,2007,27(3):111-115.
- [13] 代富强,周启刚,刘刚才.基于回归克里格和遥感的紫色土区土壤有机质含量空间预测[J].土壤通报,2014,45(3):562-567.
- [14] 刘青,范建容.长江上游生态系统土壤保持重要性评价及分区[J].长江科学院院报,2012,29(11):22-27.
- [15] Prasannakumar V, Vijith H, Geetha N, et al. Regional scale erosion assessment of a sub-tropical highland segment in the Western Ghats of Kerala, South India [J]. Water Resources Management, 2011,25(14):3715-3727.
- [16] Williams J R, Renard K G, Dyke P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation 1983,38(5):381-383.
- [17] Desmet P J J, Govers G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996,51(5):427-433.
- [18] Mccool D, Brown L, Foster G, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the Asae, 1987,30(5):1387-1396.
- [19] 刘爱霞,王静,刘正军.三峡库区土壤侵蚀遥感定量监测:基于 GIS 和修正通用土壤流失方程的研究[J].自然灾害学报,2009,18(4):25-30.
- [20] 田志会,王有年.北京山区果园生态系统土壤保持功能及其生态经济价值估算:以北京市平谷区果园为例[J].林业科学,2011,47(12):165-171.
- [21] Liu Gangcai, Li Lan, Wu Laosheng, et al. Determination of soil loss tolerance of an Entisol in Southwest China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(2):412-417.
- [22] 张彪,李文华,谢高地,等.北京市森林生态系统土壤保持能力的综合评价[J].水土保持研究,2009,16(1):240-244.
- [23] 卞鸿雁,庞奖励,任志远,等.基于土地利用变化的土壤保持效益时空动态:以黄土高原南部为例[J].生态学杂志,2012,31(9):2391-2396.
- [24] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.