

基于 GIS 和 USLE 的钦江流域土壤侵蚀评估

高峰¹, 华 璀¹, 卢 远¹, 陶艳成^{2,3}

(1. 广西师范学院 资源与环境科学学院, 南宁 530001; 2. 广西科学院

广西红树林研究中心, 广西 北海 536000; 3. 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536000)

摘 要:在 GIS 和 RS 技术支持下, 基于 USLE 模型对钦江流域土壤侵蚀进行了定量评估, 并分析了不同海拔、不同坡度、不同土地利用类型下土壤侵蚀强度特征和规律。结果表明: (1) 钦江流域年均土壤侵蚀模数为 2 608.87 t/(km²·a), 属中度侵蚀, 远大于水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 500 t/(km²·a) 的标准; (2) 随高程升高, 土壤侵蚀强度呈递减趋势。0~240 m 高程带是土壤侵蚀防治的重点区域。(3) 随坡度增大, 土壤侵蚀强度呈递减趋势。15°以下坡度带是钦江流域土壤侵蚀重点预防和治理区域。(4) 不同土地利用类型的土壤侵蚀强度差异显著, 旱地、草地和未利用地大部分处于强度侵蚀以上, 是控制流域整体土壤侵蚀状况的关键土地利用类型。

关键词:土壤侵蚀强度; GIS; RS; USLE; 钦江流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)01-0018-05

Assessment of Soil Erosion in Qinjiang Watershed Based on GIS and USLE

GAO Feng¹, HUA Cui¹, LU Yuan¹, TAO Yan-cheng^{2,3}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Guangxi Teachers Education University,

Nanning 530001, China; 2. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi

536000, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Conservation and Utilization, Beihai, Guangxi 536000, China)

Abstract: Soil erosion intensity of Qinjiang watershed was evaluated based on USLE model by applying GIS and RS technology, and analyzing characteristics and disciplines of different elevation, slope and land use types. The results show that: (1) the average soil erosion rate in the whole year was 2 608.87 t/(km²·a), belonging to the moderate erosion, but this level was larger than the soil loss tolerance of 500 t/(km²·a) in north red soil region ruled by the Ministry of Water Resources; (2) based on different altitude gradient in the research area, soil erosion intensity was in reverse proportion to the increase of the elevation gradient, so, the 0~240 m elevations was the key area of soil erosion prevention; (3) based on different slope gradient in the study area, soil erosion intensity was in reverse proportion to the increase of the slope gradient, the slope less than 15° was the key area of soil erosion prevention and management; (4) soil erosion intensity differences under different land use types in study area were significant. Dry farmland, grassland and unused land mainly distributed in the serious erosion area, which was the key land use type to control the whole soil erosion intensity in watershed.

Key words: soil erosion intensity; GIS; RS; USLE; Qinjiang watershed

土壤侵蚀主要是由水力和风力作用引起的土壤颗粒的分离与搬运过程^[1], 是当今世界最严重的环境问题之一。它不仅破坏土地资源, 造成土地退化, 引起生态环境恶化, 而且造成沟渠塘库的淤积, 加剧洪涝、干旱等灾害的发生, 严重威胁着人类的生存和发

展, 成为各国普遍关注的热点问题之一^[1-2]。此外, 流域土壤侵蚀可导致河流输沙量增加, 造成河流流量的变化和水质恶化, 对水生态功能、区域农业可持续发展 and 水土保持产生重要影响^[1]。因此, 在全球环境日益恶劣的当下, 对流域土壤侵蚀进行调查、研究、监

测和评估具有重要的理论和现实意义。

20 世纪 60 年代, Wischmeier 提出的通用土壤流失方程 (USLE, Universal Soil Loss Equation) 是目前土壤侵蚀量估算中较为广泛应用的方法^[3]。它是美国研制的用于定量预报农地或草地坡面多年平均土壤流失量的一个经验性土壤侵蚀预报模型, 主要研究由降雨引起的水动力土壤侵蚀^[4]。与其他基于物理过程的模型, 如 WEPP、EUROSEM 和 ANSWERS^[5-7] 相比较, USLE 结构简单, 所需参数易于获取, 结果可靠, 在美国乃至世界范围内得到了迅速推广和应用, 在定量评估土壤侵蚀强度、土地资源合理利用和水土保持规划等方面起到了重要作用^[8]。20 世纪 80 年代, USLE 开始引入中国并且得到了广泛的研究和应用^[9-13]。

钦江流域位于广西南部, 属于桂南独流入海水系, 广西北部湾经济区的中心。钦江流域的生态状况对于钦州市乃至全广西社会经济建设、农业可持续发展都具有重要作用。但是近年来, 流域生态环境受人为因素影响强烈, 水土流失加剧。本文基于 USLE 模型, 在 GIS 和 RS 技术支持下, 针对研究区特点选定因子计算方法, 定量评估、分析流域土壤侵蚀强度和特征, 旨在为运用 USLE 模型进行土壤侵蚀评估提供技术依据, 为钦江流域的土壤侵蚀防治、水土资源合理利用、水土保持规划和农业可持续发展提供重要参考。

1 研究区概况

钦江流域位于北纬 21°52′—22°34′, 东经 108°34′—109°30′。钦江发源于灵山县平山镇东山山麓白牛岭, 从东北向西南流, 流域面积 2 392 km²。地形呈舟状, 除流域的出口西南部外, 其他三面高, 中间低, 地势由东北沿西南方向逐渐降低, 东北部及四周多为低山丘陵地区, 高程为 250~846 m, 河流两岸为台地, 高程 10~60 m; 岩性以泥岩、泥质粉岩、沙岩为主。钦江流域属亚热带季风气候, 春夏季多暴雨, 同时受热带气旋的影响, 雨量丰沛, 多年平均降雨量为 1 600 mm, 由下游河口向上游河源递减。降雨时空分布不均匀, 4—9 月汛期的雨量约占全年降雨量的 80% 左右, 流域上游灵山县雨量略少。河流下游地势低平, 由上游携带的泥沙在河流入海口沉积, 形成冲击平原, 高程 1~6 m。植被分类上属于桂南植被区, 生长着热带雨林和亚热带的季雨林, 主要为马尾松、杉木、桉树及荷木等多种用材林, 森林覆盖率高。

2 研究方法

本研究选择通用土壤流失方程 (USLE) 来评估

土壤侵蚀影响因子, 并据此计算钦江流域土壤侵蚀模数和土壤侵蚀量。

2.1 降雨侵蚀力因子 R 估算

降雨侵蚀力是定量评估土壤水蚀的首要影响因子, 表征降雨引起侵蚀的潜在能力, 与降雨量、降雨历时、降雨动能等密切相关, 反映了降雨特性对土壤侵蚀的影响^[8]。在 USLE 方程中, Wischmeier 把 R 定义为降雨动能与最大 30 min 降雨强度的乘积^[14]。然而我国各降雨观测站对次降雨量数据未有详细记录, 因此以上参数难于获取。针对上述问题, 国内学者对降雨侵蚀力的计算进行了大量研究, 提出了一些降雨侵蚀力简易计算方法。本文采用章文波等^[15]提出的基于日降雨量的 R 值简易计算方法, 利用研究区内及邻近站点共 14 个气象观测站的日降雨量数据计算得到降雨侵蚀力因子。

2.2 土壤可蚀性因子 K 估算

土壤可蚀性是评价土壤遭受侵蚀的敏感程度的重要指标, 反映土壤对侵蚀外营力剥蚀和搬运的敏感性, 是土壤抵抗由降雨、径流产生的侵蚀能力的综合体现, 是影响土壤流失量的内在因素。在通用土壤流失方程中, 土壤可蚀性因子被定义为标准小区在单位降雨侵蚀力下的土壤流失量。本文采用 EPIC 中提到的 K 值计算方法, 利用广西第二次全国土壤调查中得到的土壤机械组成资料进行土壤可蚀性 K 值的计算。钦江流域土壤可蚀性因子 K 值见表 1。

表 1 土壤可蚀性因子 K 值

亚类名称	土壤可蚀性 K 值	亚类名称	土壤可蚀性 K 值
砖红壤	0.1555	水稻土	0.2749
赤红壤	0.3348	潜育水稻土	0.2451
紫色土	0.2466	漂洗水稻土	0.2118
滨海盐土	0.2583	咸酸水稻土	0.2081
淹育水稻土	0.3209	潜育水稻土	0.3212

2.3 坡长坡度因子 LS 估算

坡长坡度因子综合反映了坡长坡度对土壤侵蚀的影响, 通常情况下土壤侵蚀量随着坡长坡度的增加而增加^[8]。坡长因子是指一定坡长坡面上的土壤侵蚀量与标准径流小区典型坡面 (坡长 22.13 m) 土壤侵蚀量的比值; 坡度因子是指一定坡度地面上的土壤侵蚀量与标准径流小区典型坡面 (坡度 9°) 土壤侵蚀量的比值。本文采用 Remortel 等计算 LS 值的 AML 程序, 基于研究区 30 m 分辨率 DEM, 实现 LS 值的自动提取。

2.4 覆盖与管理因子 C 估算

覆盖与管理因子 C 指一定条件下有植被覆盖或实施田间管理的土地土壤流失总量与同等条件下实

施清耕的连续休闲地土壤流失总量的比值,为无量纲数,介于 0~1 之间。本文基于 NDVI 和植被覆盖率进行 C 因子值的计算。不同植被覆盖下的 C 值根据蔡崇法等^[12]的研究进行计算。

本研究采用钦江流域 2010 年 10 月份 TM 影像,在 ENVI 4.8 和 ArcGIS 中进行辐射校正、几何精校

正等,计算得到流域 C 值。

2.5 水土保持措施因子 P 估算

水土保持措施因子 P 是指采用水土保持措施的土壤侵蚀量与采用顺坡种植时土壤侵蚀量的比值,为无量纲数,介于 0~1 之间^[16]。本文中 P 因子的取值主要参照相关研究^[2,17-18]进行赋值(表 2)。

表 2 不同土地利用类型 P 值

指标	水田	旱地	有林地	灌木林地	其它林地	草地	水域	建设用地	沙地	盐碱地	沼泽地	裸土
P 值	0.15	0.35	1	1	0.7	1	0	0	1	0.1	0.1	1

3 结果与分析

土壤侵蚀是多种影响因素共同作用的结果,分析土壤侵蚀与不同因素间的对应关系对有效防止土壤侵蚀,科学开展水土保持评价及治理具有重要指导意义。

3.1 流域土壤侵蚀强度

在 ArcGIS 10 中将获取的土壤侵蚀影响因子进行叠加计算,并根据土壤侵蚀分类分级标准进行等级^[19]划分,获得研究区土壤侵蚀强度分级表(表 3)。通过表 3 数据可以得出,流域年均土壤侵蚀模数为 2 608.87 t/(km²·a),属中度侵蚀,远大于水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 500 t/(km²·a)的标准。从不同侵蚀强度的分布(表 3)来看,占流域面积 59.6% 的范围内发生轻度以下的侵蚀,说明钦江流域土壤侵蚀程度总体上较轻,但流域内强烈以上土壤侵蚀强度占到了流域面积的 16%,表明局部地区水土流失严重,这与年均土壤侵蚀模数远大于南方红壤丘陵区土壤流失量具有一致性,因此钦江流域的水

土流失治理任务还相当艰巨。

表 3 钦江流域土壤侵蚀强度分级及响应面积

侵蚀强度/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	面积/km ²	比例/%
微度(<500)	863.69	36.07
轻度(500~2500)	563.43	23.53
中度(2500~5000)	584.36	24.40
强烈(5000~8000)	109.97	4.59
极强烈(8000~15000)	239.10	9.98
强烈(≥15000)	34.17	1.43

3.2 海拔对土壤侵蚀的影响

土壤侵蚀强度与海拔具有很大的相关性,对土壤侵蚀强度与海拔的对应关系进行探讨,对掌握不同海拔下土壤侵蚀强度的分布和规律具有重要意义,也能更针对性地制定水土保持措施。根据研究区地貌和实际海拔情况,将研究区按 0~80 m,80~160 m,160~240 m,240~320 m,320~400 m,>400 m 共 6 个等级进行划分,将分级后的海拔分级图与土壤侵蚀强度分布图进行空间统计分析,得到研究区不同海拔等级下的土壤侵蚀空间分布情况(表 4)。

表 4 不同海拔下土壤侵蚀面积空间分布

侵蚀强度	<80		80~160 m		160~240 m		240~320 m		320~400 m		>400 m	
	面积/ km ²	比例/ %										
微度侵蚀	370.31	15.47	258.92	10.81	106.09	4.43	63.33	2.64	36.55	1.53	29.22	1.22
轻度侵蚀	347.81	14.53	159.07	6.64	33.37	1.39	11.19	0.47	5.89	0.25	5.44	0.23
中度侵蚀	467.26	19.52	106.47	4.45	6.53	0.27	1.81	0.08	0.91	0.04	0.83	0.03
强烈侵蚀	98.35	4.11	10.26	0.43	0.62	0.03	0.32	0.01	0.23	0.01	0.19	0.01
极强烈侵蚀	219.70	9.18	18.25	0.76	0.87	0.04	0.20	0.01	0.08	0.00	0.07	0.00
剧烈侵蚀	18.55	0.77	15.11	0.63	0.38	0.02	0.06	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
合计	1521.99	63.57	568.08	23.73	147.87	6.18	76.92	3.21	43.68	1.82	35.78	1.49

分析表 4 可知:(1)从侵蚀面积与海拔高度的关系来看,土壤侵蚀主要分布在海拔为 0~80,80~160,160~240,240~320 m 的高程带上,侵蚀面积分别为 1 521.99,568.08,147.87,76.92 km²,占侵蚀总面积的比例分别为 63.57%,23.73%,6.18%,3.21%。可见,研究区土壤侵蚀面积随着海拔的增加

呈递减规律,海拔越高,土壤侵蚀面积越小;(2)从侵蚀强度与海拔高度的关系来看,微度侵蚀在各个高程带上均有分布,由低到高不同高程带上侵蚀面积占土壤侵蚀总面积的 15.47%,10.81%,4.43%,2.64%,1.53%,1.22%,侵蚀面积随着海拔高度的增加呈递减趋势。轻度、中度和强烈侵蚀主要分布在 0~80 m

和 80~160 m 两个高程带上,侵蚀面积分别为 347.81 km² 和 159.07 km²、467.26 km² 和 106.47 km²、98.35 km² 和 10.26 km²,分别占土壤侵蚀总面积的 14.53% 和 6.64%、19.52% 和 4.45%、4.11% 和 0.43%。极强烈侵蚀分布在 0~80 m 的高度带内,土壤侵蚀面积最大,占土壤侵蚀总面积的 9.18%,其主要原因是<80 m 的地区多为平原台地,其地形平坦,坡度较小,土地利用类型多样且多为耕地,人类活动影响剧烈,从而造成侵蚀面积较大。剧烈侵蚀在各个高程带上呈零星分布。(3) 总体来说,海拔越高,侵蚀面积越少,呈递减关系。微度、轻度及中度以上土壤侵蚀主要发生在 0~240 m 高程带范围内,而强烈以上土

壤侵蚀主要发生在 160 m 以下的高程带,说明随着高程的增加,研究区土壤侵蚀强度是逐渐变弱的,因此,0~240 m 高程带区域应该是土壤侵蚀防治的重点区域。

3.3 坡度对土壤侵蚀的影响

坡度是影响土壤侵蚀发生的主要影响因素之一,因此研究不同坡度下土壤侵蚀的变化规律和特征对于水土保持工作具有重要意义。根据水利部颁布的关于水力侵蚀坡度等级划分标准(2007),按照 0~5°, 5°~8°, 8°~15°, 15°~25°, 25°~35°, >35°对坡度图进行重分类,并对分类后的坡度等级图与土壤侵蚀强度分级图进行空间叠加统计,得到研究区不通坡度级上不同侵蚀强度下的土壤侵蚀面积(表 5)。

表 5 不同坡度下土壤侵蚀面积及比例

坡度	面积/km ²							侵蚀面积 比例/%	侵蚀量 比例/%
	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈	合计		
<5°	383.30	353.71	485.14	33.76	63.83	7.93	1327.67	55.45	49.78
5°~8°	115.63	84.55	62.35	10.62	68.96	8.22	350.33	14.63	16.57
8°~15°	195.42	84.86	30.50	64.88	100.63	15.56	491.84	20.54	26.99
15°~25°	150.15	36.35	5.44	0.62	5.76	2.40	200.72	8.38	6.01
25°~35°	18.83	4.20	0.39	0.08	0.01	0.02	23.53	0.98	0.65
>35°	0.09	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.19	0.01	0.003

从表 5 可知,钦江流域土壤侵蚀与该地区的坡度具有密切关系。由不同坡度下土壤侵蚀面积比例来看,<5°坡度带内土壤侵蚀面积最大,为 1 327.67 km²,占流域侵蚀总面积的 55.45%,其次是 8°~15°, 5°~8°, 15°~25°范围,侵蚀面积分别为 491.84 km², 350.33 km², 200.72 km²,分别占流域侵蚀总面积的 20.54%, 14.63%, 8.38%。其中,微度侵蚀、轻度侵蚀及中度侵蚀主要发生在 0~5°, 5°~8°, 8°~15°, 15°~25°坡度带上,强烈以上侵蚀主要发生在 8°~15°坡度带。由表 5 还可以看出,<15°范围内土壤侵蚀量占研究区土壤侵蚀总量的 93.34%,而对于黄土高原地区^[20],<15°范围内的土壤侵蚀量仅占研究区土壤侵蚀总量的 3.08%,同样坡度带内,空间差异程度如此高,其主要原因是北方 25°以下属缓坡区域,且经过一系列的退耕还林工程后,主要成为了人工林地和经过梯田改造的基本农田,林草覆盖度高,耕作措施也采用了等高耕作,有效减少了水土流失,退耕还林工程效益显著;而南方<15°区域内,土地利用方式多样,且多为耕地,人为因素影响强烈,再加上钦江流域濒临沿海,降雨因素也起到了重要作用。相比 15°以上区域,钦江流域土壤流失量仅有 6.663%,而黄土高原区则达到了 96.92%,其主要原因是广西是一个多山地区,且山区森林覆盖率极高,有效降低了产流产沙,而北方森林覆盖率相对较小。从以上分析可以

看出南北土壤侵蚀机理和水土保持防治措施的差异。总体而言,15°以下坡度带是钦江流域土壤侵蚀重点预防和治理区域。

3.4 土地利用类型对土壤侵蚀的影响

土地利用变化能够引起影响土壤侵蚀的影响因素的变化,最终导致土壤侵蚀方式和强度的变化,如不合理的土地利用改变了地形条件、土壤物理化学性质、破坏了植被,从而加剧了土壤侵蚀,是水土流失的主要原因^[21]。因此,认清不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征和规律对于水土流失预防和治理具有重要的理论和实践意义。本研究将研究区土地利用类型图与土壤侵蚀强度图在 ArcGIS 中进行空间统计分析,得到不同土地利用方式下的土壤侵蚀分布情况(表 6)。

从表 6 可知,钦江流域不同土地利用类型间土壤侵蚀强度差异显著。对于水田、水域和建设用地三种土地利用类型而言,从侵蚀面积比例来看,主要属于微度侵蚀,主要原因是水田和建设用地水土保持良好,而水域基本无土可侵,故土壤侵蚀强度较小;有林地和其它林地虽然侵蚀面积较大,但主要以微度、轻度和中度侵蚀为主,这主要是因为有林地和其它林地植被覆盖度高,具有较强的蓄水保土能力,能有效降低产流产沙效应;灌木林地主要以中度侵蚀为主,人为毁林开荒是其根本原因,亦无水土保持措施,导致

侵蚀加剧;草地以强烈侵蚀为主,主要是流域内草地基本为自然草地,缺乏水土保持措施,加之近年来不合理的土地利用方式,导致草地退化,侵蚀加剧;旱地主要以极强烈侵蚀为主,主要原因是流域内以坡耕旱地为主,采取顺坡耕种,且多处于土山性质的低山丘陵半坡上,基本无水土保持措施,加之垦荒严重,侵蚀性降雨时间长,地表植被稀疏,更加剧了土壤侵蚀;未

利用地以剧烈侵蚀为主,这主要是因为未利用地中的沙地和裸土等缺少天然植被保土屏障,无水土保持措施,侵蚀严重。从以上分析可知,流域内旱地、草地和未利用地大部分处于强度侵蚀以上,是控制流域整体土壤侵蚀状况的关键土地利用类型。因此,流域内应加强以上三种土地利用类型的合理利用和规划管理,制定有效的水土保持措施,改善流域生态环境状况。

表 6 不同土地利用类型下土壤侵蚀强度分布情况

土地利用类型	微度侵蚀		轻度侵蚀		中度侵蚀		强烈侵蚀		极强烈侵蚀		剧烈侵蚀		总面积/ km ²
	面积/ km ²	比例/ %											
水田	335.01	71.94	20.87	4.48	82.19	17.65	12.79	2.75	8.26	1.77	6.56	1.41	465.67
旱地	8.45	3.20	5.21	1.97	43.50	16.46	8.51	3.22	191.23	72.36	7.37	2.79	264.28
有林地	252.33	35.65	242.59	34.27	185.61	26.22	6.24	0.88	9.45	1.34	11.60	1.64	707.82
灌木林地	1.75	17.29	2.60	25.70	4.52	44.68	0.65	6.41	0.57	5.60	0.03	0.32	10.12
其它林地	5.07	1.07	231.67	48.70	219.12	46.07	6.94	1.46	11.58	2.44	1.28	0.27	475.67
草地	22.78	14.71	30.49	19.69	22.37	14.45	70.08	45.25	8.29	5.36	0.86	0.55	154.87
水域	74.25	77.36	6.95	7.24	8.44	8.79	1.80	1.87	4.28	4.46	0.26	0.27	95.98
建设用地	165.37	77.92	22.12	10.42	17.14	8.08	2.28	1.07	4.88	2.30	0.46	0.22	212.24
未利用地	0.85	10.49	0.73	8.99	0.75	9.29	0.49	5.99	0.61	7.49	4.68	57.74	8.11

4 结论

本文在 GIS 和 RS 技术支持下,利用 USLE 模型定量计算了钦江流域潜在土壤侵蚀模数和侵蚀量,并对不同海拔、不同坡度、不同土地利用方式下的土壤侵蚀强度特征和规律进行了分析,结果表明:流域年均土壤侵蚀强度以中度为主,不同海拔、不同坡度、不同土地利用方式下的土壤侵蚀强度差异明显。

(1) 钦江流域年均土壤侵蚀模数为 2 608.87 t/(km²·a),属中度侵蚀,远大于水利部规定的南方红壤丘陵区土壤允许流失量 500 t/(km²·a)的标准。因此,钦江流域水土流失治理任务还相当艰巨。

(2) 研究区不同海拔梯度下,随高程升高,土壤侵蚀强度呈递减趋势。0~240 m 高程带是土壤侵蚀防治的重点区域。

(3) 研究区不同坡度梯度下,随坡度增大,土壤侵蚀强度呈递减趋势。25°以下坡度带是钦江流域土壤侵蚀重点预防和治理区域。

(4) 研究区不同土地利用类型下的土壤侵蚀强度差异显著。旱地、草地和未利用地大部分处于强度以上侵蚀,是控制流域整体土壤侵蚀状况的关键土地利用类型。应加强以上三种土地利用类型的合理利用和规划管理。

参考文献:

[1] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等.基于 USLE 的东江流域土

壤侵蚀量估算[J].自然资源学报,2010,25(12):2154-2164.

- [2] 许月卿,邵晓梅.基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算:以贵州猫跳河流域为例[J].北京林业大学学报,2006,28(4):67-71.
- [3] 赵磊,袁国林,张琰,等.基于 GIS 和 USLE 模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持通报,2007,27(3):42-46.
- [4] 赵琰鑫,张万顺,王艳,等.基于 3S 技术和 USLE 的深圳市茜坑水库流域土壤侵蚀强度预测研究[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(3):24-27.
- [5] 周正朝,上官周平.土壤侵蚀模型研究综述[J].中国水土保持科学,2004,2(1):52-55.
- [6] Cochrane T A, Flanagan D C. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models[J]. Soil and Water Conservation, 1999, 54(4):678-685.
- [7] Liu B Y, Nearing M A. The WEPP watershed model: III. Comparisons to measured data from small watersheds[J]. Trans Am Soc of Agric Eng, 1997, 40(4):945-951.
- [8] 郭兵,陶和平,刘斌涛,等.基于 GIS 和 USLE 的汶川地震后理县土壤侵蚀特征及分析[J].农业工程学报,2012,28(14):118-126.
- [9] 陈法扬,王志明.通用土壤流失方程在小良水土保持试验站的应用[J].水土保持通报,1992,12(1):23-41.
- [10] 黄炎和,卢程隆,付勤,等.闽东南土壤流失预报研究[J].水土保持学报,1993,7(4):13-18.

(下转第 28 页)

- [14] Houghton J T. Climate Change 1995: The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [15] Robock A, Turco R P, Harwell M A, et al. Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis [J]. Climatic Change, 1993, 23(4): 293-335.
- [16] Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. Climate Models and Their Evaluation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [17] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 2 种降尺度方法在太湖流域的应用对比[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 160-169.
- [18] Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D6): 6603-6621.
- [19] Willby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations [J]. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548.
- [20] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.
- [21] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估[J]. 应用气象学报, 2002, 13(5): 513-525.
- [22] 施小英, 徐祥德, 徐影. 中国 600 个站气温和 IPCC 模式产品气温的比较[J]. 气象, 2005, 31(7): 49-53.
- [23] IPCC. Emissions Scenarios, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [24] 曹杰, 陶云. 中国的降水量符合正态分布吗[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 115-120.
- [25] 刘绿柳, 刘兆飞, 徐宗学. 21 世纪黄河流域上中游地区气候变化趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3): 167-172.
- [26] 丁一汇, 任国玉, 石广玉. 气候变化国家评估(D): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [27] Chen J, Brissette F P, Llcontre R. Coupling statistical and dynamical methods for spatial downscaling of precipitation [J]. Climatic Change, 2012, 114(3/4): 509-526.
- [28] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来地面气温变化的统计降尺度分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 153-161.

(上接第 22 页)

- [11] 刘黎明, 林培. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀定量方法与模型的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 73-79.
- [12] 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.
- [13] 李婷, 张世熔, 廖明辉, 等. 基于 3S 和 USLE 的沱江流域中游土壤侵蚀定量评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 24-27.
- [14] Wischmeier W, Smith D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]// Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: United States Department of Agriculture, 1978.
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 706-708.
- [16] 张旭群, 陈耀强, 陈浩昆, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 的粤东黄冈河流域土壤侵蚀评估[J]. 中国水土保持, 2013(2): 34-37.
- [17] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [18] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算: 以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
- [19] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190—2007)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [20] 秦伟, 朱清科, 张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 157-163.
- [21] 王思远, 王光谦, 陈志祥. 黄河流域土地利用与土壤侵蚀的耦合关系[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 32-37.