

川西高原精细化生态敏感性评价

吕远洋, 刘志红, 叶帮苹, 张思, 张洋

(成都信息工程学院 资源环境学院, 成都 610225)

摘要:川西高原地处我国第一、二阶梯过渡带,生态类型复杂,生态敏感性评价对川西高原环境保护决策、全国生态敏感性区划有重要意义。采用多因子综合分析法,选取水力侵蚀敏感性、冻融侵蚀敏感性、沙漠化敏感性、石漠化敏感性指标作为川西高原生态敏感性评价的依据,对川西高原进行精细化的生态敏感性评价。结果表明:(1)川西高原水力侵蚀中度及以上敏感区面积约为14 312.62 km²,主要分布在凉山州中部、甘孜州南部;(2)冻融侵蚀中度及以上敏感区总面积约为46 250.68 km²,主要分布于甘孜州西北部、阿坝州南部;(3)沙漠化中度及以上敏感区面积约为1 956.49 km²,主要分布在甘孜州西北部、凉山州中部;(4)石漠化极度、高度、中度敏感区总面积约为765.88 km²,主要分布于阿坝州南部、甘孜州东缘、西南。这些敏感性等级较高的地区,也是生态环境恶化的地区,应引起足够重视,及时采取有效措施预防、制止生态环境恶化。

关键词:生态敏感性;川西高原;GIS;空间分析

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0272-06

Evaluation on Ecological Sensitivity of Chuanxi Plateau Based on GIS

LÜ Yuanyang, LIU Zhihong, YE Bangping, ZHANG Si, ZHANG Yang

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Chuanxi Plateau is located in transition zone from the first to the second step, its ecological type is complex and its ecological sensitivity evaluation is crucial to environmental protection decision of Sichuan Province and ecological function zoning of China. Using the multifactor comprehensive analysis method, the sensitivity of water erosion, freeze-thaw erosion, desertification sensitivity, sensitivity of rocky desertification were selected as the basis of ecological sensitivity evaluation of the West Sichuan Plateau. The results showed that: (1) moderately water erosion sensitive area in Chuanxi Plateau is 14 312.62 km², mainly distributes in central Liangshan State, south of Ganzi State; (2) moderate and above freezing thawing erosion sensitive area in Chuanxi Plateau is 46 250.68 km², mainly distributes in northwest of Ganzi State, south of Aba state; (3) moderate desertification sensitive area in Chuanxi Plateau is 1 956.49 km², mainly distributes in northwest of Ganzi State, central Liangshan State; (4) moderate and above stony desertification sensitive area in Chuanxi Plateau is 765.88 km², mainly distributes in south of Aba State, east and southwest of Ganzi State. These high sensitivity areas are also the ecological deterioration areas, should be paid enough attention and effective measures should be taken to prevent environmental degradation.

Keywords: ecological sensitivity; Chuanxi Plateau; GIS; spatial analysis

随着我国经济的飞速发展,生态环境与经济发展的冲突日益加剧,生态环境问题逐渐成为制约经济发展的重要因素,环境保护刻不容缓。近年来,生态敏感性评价作为制定环境保护措施的重要前提和环境保护区划的基础条件越来越受到国内外研究人员的重视。生态系统敏感性是生态系统在特定的时空尺度相对于干扰而具有的敏感反应和恢复能力,它是生

态系统固有属性在干扰作用下的表现^[1]。生态环境敏感性评价实质就是在不考虑人类活动影响的前提下,评价具体的生态过程在自然状况下潜在的产生生态环境问题的可能性大小,敏感性高的区域,当受到人类不合理活动影响时,就容易产生生态环境问题,应该是生态环境保护和恢复建设的重点^[2]。

随着3S技术的发展,国内外针对生态敏感性的

评价方法已相对成熟,评价结果科学可靠,目前国内主要是针对某区域单一的生态环境问题进行研究,如西北地区荒漠化、岩溶地区石漠化等^[3-4],单一的生态敏感性评价没有考虑不同生态环境间的相互影响,评价结果比较单薄;近年来对生态系统敏感性的评价越来越受到重视,如对辽宁省、云南省生态系统的敏感性评价^[5-6],对辽宁省、云南省的生态环境保护有重要指导意义,但是评价结果仍受到数据质量的限制,评价结果较粗糙,不能更好地为区域内环境保护工作服务;精细化的、综合性的生态敏感性评价已成为生态敏感性评价发展的趋势^[7]。

川西高原是我国重要的地理过渡区,涵盖若尔盖湿地等多个国家生态保护区,它对整个四川省甚至全国生态环境保护都有重要价值,同时川西高原是我国典型的高生态敏感区,对川西高原生态敏感性评价有重要现实意义。目前由于川西高原数据难以获取、自然条件相对恶劣等原因,对川西高原生态敏感性评价很少,对川西高原生态系统敏感性的研究尤为重要而迫切。本研究以川西高原为研究区域,采用单因子与多因子相结合的评价体系,结合川西高原生态环境现状,以 90 m 栅格单元作为敏感性评价的单位,完成对川西高原的精细化生态敏感性评价,为川西高原生态环境保护、可持续发展战略的制定和实施提供科学的依据。

1 研究区概况

川西高原为青藏高原东南缘和横断山脉的一部分,包括甘孜州、阿坝州、凉山州 3 个自治州,面积约为 30 万 km²。地形复杂,地势高差悬殊,海拔 400~7 000 m,包括龙门山断裂带在内的多条断裂带;水系丰富,金沙江、雅砻江等主要水系贯穿整个研究区域;气候类型繁多,包括寒温带、温带、暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带等;川西北高山高原河谷干暖、山地冷湿,降水量少,适合牧草生长;川西南山地全年气温偏高,干湿季节明显,河谷地区受焚风影响形成典型的干热河谷气候;土壤类型丰富,涵盖 27 余种土类;地貌以起伏山地为主,多高山极高山;是我国植被类型较丰富的地区之一,几乎包括我国亚热带区域的所有栽培植物,并有不少南亚热带和温带的种类,针叶林类型之多为全国之冠。

2 数据与方法

2.1 生态敏感性评价体系

生态敏感性建立在研究区内多种自然因素的作用基础上,因此本研究采取多因子综合评价的方法^[8],根据 2012 年国家环境保护部的《全国省级环境功能区划纲要》的要求,通过川西高原的土壤侵蚀敏

感性、沙漠化敏感性、石漠化敏感性指标综合反映川西高原生态系统敏感性,采用定性评价与定量评价结合的方法,结合川西高原生态环境现状,确定各因子分级标准,将各单因子敏感性划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感、极敏感 5 级。

在考虑川西高原环境现状和环境恶化的主要影响因素基础上,选取以下方法作为生态敏感性评价方法:

(1) 土壤侵蚀敏感性评价根据全国土壤保持区划^[9],将川西高原分为冻融侵蚀和水力侵蚀一级区,以冻融侵蚀敏感性和水力侵蚀敏感性综合评价川西高原的土壤侵蚀敏感性。冻融侵蚀敏感性评价参照李辉霞等^[10]的冻融侵蚀敏感性评价指标,考虑气温年较差、植被覆盖类型、坡度和降水因子。水力侵蚀敏感性评价参考土壤侵蚀分类分级标准^[11],选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性、地形起伏度为因子,其中降雨侵蚀力是水力侵蚀的主要动力因子,选取更符合我国国情的修正的 Richardson 日降雨侵蚀力模型^[12];土壤可蚀性 K 值采用目前应用最广泛的 EPIC 模型估算^[13];地形起伏度是水土流失模型中重要的地形指标,川西高原地区整体地形起伏较陡,因此采用 Liu 等^[14]的地形起伏度公式。

(2) 沙漠化敏感性评价参考刘康^[2]的沙漠化敏感性评价指标,综合考虑湿润指数、大风天数、土壤质地、冬春植被覆盖等自然条件,选取目前最通用的湿润指数计算方法,即年湿润指数(W)为年降水与年潜在蒸发之比。

(3) 石漠化敏感性评价参考肖红艳^[15]的石漠化敏感性评价方法,在判别是否为喀斯特地形的基础上选取坡度、植被覆盖度为石漠化敏感性评价的因素,叠加获得石漠化敏感性分布。

2.2 数据来源及处理

数据类型包括矢量数据、栅格数据、气象站数据和图片数据等,主要数据包括 2002—2012 年四川省植被覆盖数据,2009—2012 年四川省气象站气温、降水、风速、蒸散发数据,30 m 分辨率四川省 DEM 数据、四川省市级、县级行政边界数据,1:10 万四川省土地利用数据等。土地利用数据等遥感影像数据为 MODIS 数据,MODIS 是目前卫星上唯一将实时观测数据通过 X 波段向全世界直接广播的传感器,相对 NOAA 卫星和陆地卫星数据,MODIS 数据具有空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率高的特征,尤其适用于对自然灾害的实时监测。植被覆盖度数据从 TM 影像中提取,TM 遥感影像由于其特殊的波普特征,具有可以获取高分辨率、高精度、更丰富的植被信息的优势。

数据处理、计算、建模以 ArcGIS, ERDAS, ACESSE

软件为主。使用 ACESSE 软件完成气象站数据的误差剔除及筛选工作;使用 ArcGIS 软件完成气象站数据可视化、空间插值、确定插值精度,图片数据矢量化、矢量数据栅格化、栅格计算、空间分析等工作;通过 ENVI 软件对获取的 MODIS, TM 遥感影像进行几何校正及提取;使用 ERDAS 软件建模最终获取复合因子的生态敏感性分布。为保证评价结果的精度,对降水、风速等数据的空间插值参考高程等影响因子,并通过交叉检验的方法选取对川西高原地区精度最高的空间插值方法,作为建模因子的栅格数据分辨率均通过重采样统一到 90 m。川西高原地形和植被盖度分布如图 1—2 所示。

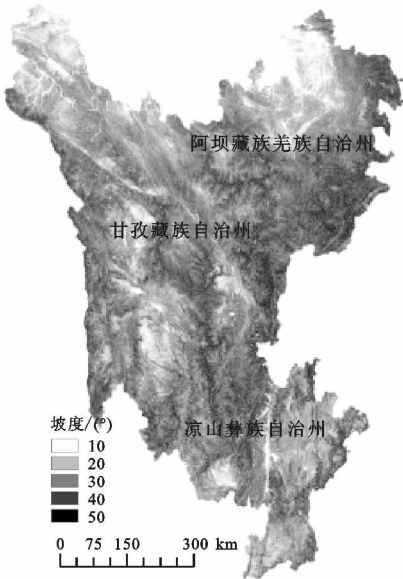


图 1 川西高原坡度

3 结果与分析

3.1 土壤侵蚀敏感性分析

川西高原属于四川省土壤侵蚀较严重地区,土壤侵蚀敏感性较高,西北地区冻融侵蚀强度大,偏南地区水力侵蚀敏感性强度大。

3.1.1 水力侵蚀敏感性分析 川西高原水力侵蚀中度敏感地区面积为 14 312.62 km²,占川西高原总面积的 4.93%,主要分布在川西高原中偏南地区雅砻江中下游与吉珠沟、力丘河交汇地区,甘孜州东南九龙河流域,甘孜州北部硕衣河流域。

3.1.2 冻融侵蚀敏感性分析 如表 2 所示,川西高原以冻融侵蚀中度敏感区为主,中度敏感地区面积为 20 117.87 km²,占川西高原总面积的 6.88%,主要分布在甘孜州西北部石渠县、色达县境内,甘孜州南部有零星分布。极敏感、高度敏感地区面积约为 26 132.82 km²,占川西高原总面积的 9.07%,主要分布在甘孜州西北部山区和阿坝州西北部通天河流域、金沙江中上游流域,这些地区毗邻青藏高原,坡度大,是我国冻融侵蚀一级区。

甘孜州冻融侵蚀轻度、中度、高度、极敏感区面积

均是各州中最大的,且远远高于其他两州,占川西高原冻融侵蚀轻度、中度、高度、极敏感区总面积均超过 70%(表 2)。川西高原冻融侵蚀极敏感、高度敏感地区是我国冻融侵蚀一级区,是冻融侵蚀造成水土流失最严重的区域之一,同时这些地区温度低、坡度大,治理难度大,因此应及时开展冻融侵蚀防治工作。保护和恢复斜坡上的植被,增强根系固土能力,延缓融雪速度,分散调节地表径流,是控制冻融侵蚀的主要途径^[18]。

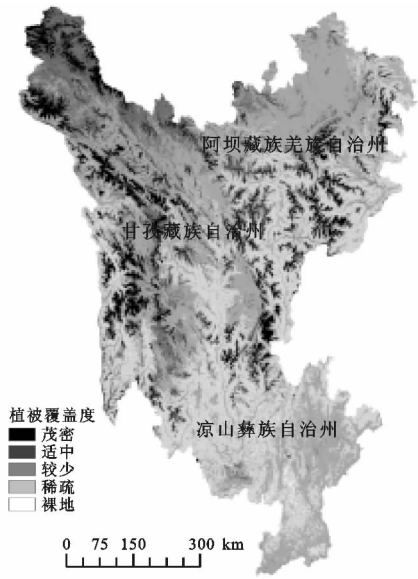


图 2 川西高原植被盖度

在川西各州中,甘孜州的水力侵蚀中度敏感区面积最大,占川西高原水力侵蚀中度敏感区面积的 53.70%,凉山州次之,占川西高原中度敏感区面积的 43.21%,甘孜州、凉山州水力侵蚀中度敏感区面积远远大于阿坝州(表 1)。根据川西高原地区土壤侵蚀现状,川西高原地区水力侵蚀中度敏感地区是预防水力侵蚀的重点地区,水力侵蚀造成的土壤流失严重,在水力侵蚀中度敏感地区应加大退耕还林还草力度,提高土壤持水力^[16-17]。

表 1 川西高原各州水力侵蚀敏感区面积

项目	阿坝州		甘孜州		凉山州	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
轻度敏感	74868.75	30.09	122961.26	49.42	50994.15	20.49
中度敏感	442.56	3.09	7685.33	53.70	6184.73	43.21
敏感面积	75311.31	28.62	130646.59	49.65	57178.88	21.73

表 2 川西高原各州冻融侵蚀敏感区面积

项目	阿坝州		甘孜州		凉山州	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
轻度敏感	729.51	8.88	7477.15	91.04	6.25	0.08
中度敏感	3440.62	17.10	16666.02	82.84	11.23	0.06
高度敏感	4226.45	25.74	12186.10	74.22	6.69	0.04
极敏感	2847.83	29.32	6861.02	70.63	4.73	0.05
敏感区面积	11244.40	20.65	43190.29	79.30	28.90	0.05

3.2 荒漠化敏感性分析

川西高原阿坝州南部、甘孜州东部、西北部荒漠化敏感性强度较大。

3.2.1 沙漠化敏感性分析 川西高原沙漠化中度敏感地区面积为 1 956.49 km²,占川西高原总面积的 6.95%,主要分布在甘孜州西北部石渠县、甘孜州东部丹巴县,零星分布于盐源县、得荣县北部。

甘孜州、阿坝州和凉山州,3 州沙漠化中度敏感区面积均很小,甘孜州和凉山州面积相对较大(表 3)。在川西高原地区,相较于其他生态敏感性指标,沙漠化敏感性强度较低,沙漠化面积较少,但是沙漠化具有蔓延快、对生态环境破坏性大等特点,应引起高度重视,尤其是沙漠化中度敏感的地区,应建立生态功能保护区,发展圈养牧业,退耕还草,合理利用水资源。

表 3 川西高原各州沙漠化敏感区面积

项目	阿坝州		甘孜州		凉山州	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
轻度敏感	76538.95	28.32	140219.15	51.89	53481.90	19.79
中度敏感	345.45	17.66	805.52	41.17	805.52	41.17
敏感区面积	76884.40	28.25	141024.67	51.81	54287.42	19.94

3.2.2 石漠化敏感性分析 川西高原石漠化极敏感地区面积为 30.38 km²,占川西高原总面积的 0.04%,零星分布在阿坝州南部的石灰岩地区,石漠化高度敏感地区面积为 125.63 km²,占川西高原总面积的 0.15%,中度敏感地区面积为 609.88 km²,占川西高原总面积的 0.2%,高度敏感、中度敏感区,主要分布在川西南峡谷地区、大渡河下游石灰岩地区、金沙江下游石灰岩地区及川西高原西北通天河上游石灰岩地区,零星分布在阿坝州东北九寨沟县、甘孜州雀儿山附近,这些地区喀斯特地貌明显。

阿坝州石漠化极敏感区面积远大于其他两州,占川西高原极敏感区的 77.98%;甘孜州高度、中度敏感区面积较大,其中高度敏感区面积与阿坝州高度敏感区面积接近,分别占川西高原石漠化高度敏感区面积的 58.91%和 41.09%,中度敏感区面积远大于其他两州,占川西高原石漠化中度敏感区的 76.03%(表 4)。石漠化是熔岩退化的极端形势,石漠化敏感的地区土壤流失的可能性更大,因此,应该将石漠化防治与水土流失防治相结合,避免更严重的生态危害出现。

表 4 川西高原各州石漠化敏感区面积

项目	阿坝州		甘孜州		凉山州	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
轻度敏感	1082.69	11.27	5188.69	54.00	3337.44	34.73
中度敏感	134.69	22.08	463.69	76.03	11.50	1.89
高度敏感	51.63	41.09	74.00	58.91	0.00	0.00
极敏感	23.69	77.98	6.69	22.02	0.00	0.00
敏感区面积	1292.69	12.46	5733.06	55.26	3348.94	32.28

3.3 生态环境敏感性分析

川西高原北偏西地区冻融侵蚀和沙漠化敏感性强度较大,南部水力侵蚀敏感性强度较大,川西高原东北部石漠化敏感性强度较大。

研究表明中度敏感及以上敏感区是最危险的^[19],极易受人类活动、自然条件变化的影响,是重

点的生态环境保护区;同时生态环境是一个复杂的体系,不同的生态类型相互交叉,不同的生态敏感性之间相互影响,因此,本研究将川西高原生态敏感区分为两类:(1)单一型高敏感区,区域内只有一种生态敏感性属于中度敏感或以上;(2)复合型高敏感区,区域内有多种生态敏感性属于中度敏感或以上。

阿坝州部分地区属于复合型高敏感区,包括冻融侵蚀、石漠化、水力侵蚀高敏感区;部分地区属于单一型高敏感区,以冻融侵蚀高敏感区为主。金川县、壤塘县、马尔康县以冻融侵蚀极敏感区、高度敏感区为主,同时存在水力侵蚀中度敏感区,石漠化高度敏感区,是比较明显的冻融侵蚀、水力侵蚀、石漠化复合型高敏感区;松潘县、红原县以冻融侵蚀极敏感、高度敏感区为主,没有其他类型的高敏感区分布,是典型的冻融侵蚀单一型高敏感区。

甘孜州以复合型敏感区为主,包括冻融侵蚀、水力侵蚀、沙漠化、石漠化高敏感的地区。巴塘县、康定县、泸定县是石漠化极敏感、高度敏感区,存在集中分布的冻融侵蚀极敏感、高度敏感区,是石漠化、冻融侵蚀复合高敏感区;石渠县、丹巴县、得荣县沙漠化中度敏感区集中,同时存在冻融侵蚀极敏感、高度敏感区,是沙漠化、冻融侵蚀复合高敏感区;除雅江县外,甘孜州所有存在水力侵蚀中度敏感性的区域,都有冻融侵蚀极敏感、高敏感性分布,属于冻融侵蚀、水力侵蚀复合型高敏感区。

凉山州以单一型高敏感区为主,主要是水力侵蚀高敏感区。水力侵蚀中度敏感性区域广泛分布于凉山州,中部的冕宁县、喜德县、德昌县、盐源县东部、会理县水力侵蚀中度敏感区集中;盐源县、喜德县存在零星分布的沙漠化中度敏感区或石漠化高度敏感区,属于不明显的复合型高敏感区。

在制定灾害防治措施及环境保护政策时,在单一型高敏感地区应针对单一的生态高敏感类型重点防御,而在复合型高敏感区,由于多种生态高敏感类型相互作用,应综合考虑,全面防御,如在金川县、壤塘县、马尔康县等冻融侵蚀、水力侵蚀复合敏感区,一旦发生水力侵蚀会加速冻融侵蚀,造成更严重的水土流失,而冻融侵蚀敏感性越高的地区,侵蚀沟发展的可能性越大,侵蚀沟的发展会加剧水力侵蚀力度,所以在这些区域应尽量减少人为因素的破坏,在延缓融雪速度,加强根系固土能力的同时,增强土壤持水力;在石渠县、丹巴县、得荣县等沙漠化、冻融侵蚀复合敏感区,沙漠化会引起土壤质量下降、生物量降低等一系列危害,直接或间接导致冻融侵蚀敏感性增强,而冻融侵蚀引起的山坡岩体破碎会造成土壤质地改变,沙漠化敏感性增强,所以在这些区域,应在减少过度放牧、退耕还林还草的同时,延缓融雪速度,预防冻融侵蚀发生。

4 结论

(1) 科学合理地分析了川西高原的生态敏感性,

结果更精细化且与环境现状吻合度高,川西高原生态敏感性空间分布的主要特征是冻融侵蚀敏感性、石漠化敏感性强度最大,水力侵蚀敏感区分布最广,沙漠化敏感区分布集中;

(2) 以县域为单位将川西高原分为不同的单一型敏感区和复合型敏感区能为环境保护政策和灾害防治工作的实施提供科学依据,利于达到环境保护因地制宜的目的。单一型敏感区主要包括松潘县、雅江县、冕宁县等,这些地区单一的生态敏感性等级较高,应有针对性地制定防御措施;复合型生态敏感区主要包括石渠县、德格县、康定县、理县、壤塘县、小金县等,这些地区生态特性复杂,是生态环境保护的重点;

总之,川西高原由于其独特的地理位置、地形因素、海拔因素、气候因素等,人类活动对自然环境的影响较轻,生态环境现状较好,但是川西高原生态环境不敏感地区少,一旦破坏自我修复能力较弱,易发展成高度敏感、极敏感,应引起足够的重视。

致谢:感谢刘志红教授对本研究的悉心指导!感谢中科院植物所白文明教授对本文写作的帮助!

参考文献:

- [1] 刘燕华,李秀彬.脆弱生态环境与可持续发展[M].北京:商务印书馆,2001.
- [2] 刘康,欧阳志云,王效科,等.甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布[J].生态学报,2003,23(12):2711-2718.
- [3] 刘康,欧阳志云.基于GIS的甘肃省土地沙漠化敏感性评价[J].水土保持通报,2002,22(5):29-31.
- [4] 肖荣波,欧阳志云,王效科,等.中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J].生态学杂志,2005,24(5):551-554.
- [5] 李东梅,高正文,付晓,等.云南省生态功能类型区的生态敏感性[J].生态学报,2010,30(1):138-145.
- [6] 万忠成,王治江,董丽新,等.辽宁省生态系统敏感性评价[J].生态学杂志,2006,25(6):677-681.
- [7] 颜磊,许学工,谢正磊,等.北京市域生态敏感性综合评价[J].生态学报,2009,29(6):3117-3125.
- [8] Cassel-Gintz M, Petschel-Held G. GIS-based assessment of the threat to world forests by patterns of non-sustainable civilisation nature interaction[J]. Journal of Environmental Management, 2000, 59(4): 279-298.
- [9] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [10] 李辉霞,刘淑珍,钟祥浩,等.基于GIS的西藏自治区冻融侵蚀敏感性评价[J].中国水土保持,2005(7):44-46.
- [11] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190-96[S].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [12] 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): 705-711.
- [13] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. Modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(1): 129-144.
- [14] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [15] 肖红艳. 成渝经济区重庆地区重点产业发展战略生态影响评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [16] 皇甫大林. 浅谈西藏水土流失治理技术研究[J]. 中国水利, 2011(2): 33-35.
- [17] 曾月娥, 伍世代, 王强. 南方丘陵生态脆弱区生态文明区划探讨[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1224-1230.
- [18] 刘淑珍, 刘斌涛, 陶和平, 等. 我国冻融侵蚀现状及防治对策[J]. 中国水土保持, 2013(10): 41-44.
- [19] 李东梅, 吴晓青, 于德永, 等. 云南省生态环境敏感性评价[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5270-5278.

~~~~~

(上接第 267 页)

- [23] Camille R, David N, John W, et al. Process-evaluation of tropospheric humidity simulated by general circulation models using water vapor isotopologues: 1. Comparison between models and observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(D5): 214-221.
- [24] Yoshimura K, Sato K, Aoi N, et al. Cell-assisted lipotransfer for cosmetic breast augmentation supportive use of adipose-derived stem/stromal cells[J]. Aesthetic Plastic Surgery, 2008, 32(1): 48-55.
- [25] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氙指示水汽来源[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1945-1954.
- [26] Sen P K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.

~~~~~

(上接第 271 页)

- [14] 张磊, 潘婕, 陶生才, 等. 基于标准化降水指数的近 51 a 山东省临沂市旱涝时空特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(4): 695-701.
- [15] 车少静, 李春强, 申双和. 基于 SPI 的近 41 年(1935—2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 137-143.
- [16] 杜华明, 贺胜英. 岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(1): 153-157.
- [17] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 178-182.
- [18] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[R]. California: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993.
- [19] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标和 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级 GB/T 20481—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [21] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [22] Vicente-Serrano S M, Cuadrat-Prats J M. Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE of the Iberian peninsula) during the second half of the twentieth century [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 88(3/4): 247-258.