

甘肃省生态环境敏感性评价及其空间分布

刘 康¹, 欧阳志云², 王效科², 徐卫华², 苗 鸿²

(1. 西北大学城市与资源学系, 中国 西安 710069; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国 北京 100085)

摘要: 为了促进生态环境建设和保护, 实施宏观规划和管理, 研究以甘肃省为案例, 从方法论的角度, 利用生态环境现状调查资料和相关研究成果进行了生态环境敏感性的综合评价, 辨识出了甘肃省主要生态环境敏感区域。研究表明: (1) 在生态环境调查的基础上, 应用 GIS 空间分析方法进行生态环境敏感性评价具有可操作性和结果的可靠性。(2) 甘肃省的生态环境敏感性区域分布比较广泛, 极敏感区占全省面积的 1.1%, 高度敏感区占 57.4%。其中水土流失极敏感区占 0.21%, 高度敏感区占 24.6%, 主要集中在黄土高原, 甘南高原南部和北部, 陇南山地的西礼盆地、徽成盆地等地区; 沙漠化极敏感区面积占 0.8%, 高度敏感区面积占 33.1%, 主要集中在甘肃北部、安西中部地区和肃北的东南部; 土壤盐渍化基本无极敏感区, 高度敏感区域占 1.1%, 主要集中在疏勒河中下游、黑河中游以及石羊河下游。对于这些敏感区域的保护, 应该是生态环境保护 and 建设的重中之重。

关键词: 生态环境; 敏感性; 空间分析; 评价; 甘肃省

Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in Gansu Province

LIU Kang¹, OUYANG Zhi-Yun², WANG Xiao-Ke², XU Wei-Hua², MIAO Hong² (1. Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2711~2718.

Abstract: For regional social and economic sustainable development, strengthening ecosystem management at provincial scale is prerequisite. One of the most important tool is to identify the critical or sensitive area that is easy to be degraded. So herein a methodology of eco-environmental sensitivity assessment was proposed and a case of Gansu Province was studied. Eco-environmental sensitivity was defined as the possibility of formation and generation of eco-environment problem in a given region influenced by natural factors. High sensitivity region is the one where eco-environmental problems may occur easily in disturbance of human activity. In this paper, eco-environmental problems considered are water erosion, desertification, salinisation as assessment objects. For each object, major influencing factors are identified. water erosion is influenced by rainfall erosivity, soil texture, relief, and vegetation type; desertification is influenced by wetness index, soil texture, days the wind speed > 6 m/s, and vegetation

基金项目: 中国科学院系统生态学重点实验室基金资助项目; 国家环保总局资助项目; 中国科学院创新工程项目 (KZCX2-405)

收稿日期: 2002-12-18; **修订日期:** 2003-08-21

作者简介: 刘 康 (1963~), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 副教授, 从事区域生态评价与规划, 植被地理, 景观生态学等研究。E-mail: Liukangs@public.xa.sn.cn

Foundation item: Key Laboratory of Ecosystems Ecology, CAS and Project of State Environmental Protection Agency, Knowledge Innovation Program of CAS (No. KZCX2-405)

Received date: 2002-12-18 **Accepted date:** 2003-08-21

Biography: LIU Kang, Master, Associate professor, main research field: regional ecology.

cover; salinisation is influenced by evaporation/precipitation, underwater minerality, and geomorphology. Each influencing factor was graded into 5 classes of sensitivity to eco-environmental problem; insensitive, less sensitive, sensitive, more sensitive, and the most sensitive. Based on the information of eco-environmental investigation and previous studies, we have drawn the distributions of sensitivity of factors influencing eco-environmental problems. Integrated assessments of sensitivity to water erosion, desertification, salinisation have been done from multiplying each sensitivity of influencing factor by GIS technique. The following results have been obtained. Firstly, in Gansu Province, the region sensitive or more to eco-environmental problem was large and widely distributed. The most sensitive region took up 1.1% of the total area of the province, and the more sensitive region 57.4%. In the total area of sensitive or more region, the most sensitive of water erosion cover an area of 0.21%, mainly Malian watershed of Jing River, Hulu river watershed of Wei River and Zuli river watershed of Yellow river. And the more sensitive of water erosion cover an area of 24.6%, mainly in loess plateau, south and north of Gannan Plateau, and Xili and Huicheng basin of Longnan mountainous region. The most sensitive of desertification cover 0.8%, mainly in the north of Gansu, the middle part of Anxi county, and southeast corner of Subei county, the more sensitive region of desertification cover 33.1%, mainly in Hexi Corridor, and its north Alashan Plateau, Beishan Mountain, the front belt of east Aerjin Mountain, north hill of Loess Plateau and Yellow river coastwise of Gannan plateau. There is no region the most sensitive to salinisation. The more sensitive region to salinisation take up 1.1%, mainly in the middle-lower reaches of Shule River, the middle-lower reaches of Hei River and the lower reaches of Shiyang River. Secondly, the sensitivity assessment results are consistent with present distribution of eco-environment problems. High sensitivity region is properly the region where eco-environment problems are very serious now, which shows that it is manipulability and reliability to use GIS-based assessment of eco-environment sensitivity described in this paper. Thirdly, high sensitive region of eco-environment problem identified in this paper should be taken as priority area for ecological protection and restoration, and taken more counter-measure.

Key words: eco-environment problem; sensitivity; spatial analysis; assessment; Gansu Province

文章编号:1000-0933(2003)12-2711-08 中图分类号:S288 文献标识码:A

尽管近些年来,中国的社会经济发展取得了很大的成功,但是生态环境的恶化状况并没有彻底改变,水土流失、沙漠化、沙尘暴、酸雨等生态环境问题依然非常严重^[1]。近来,国务院颁发的“全国生态环境建设规划纲要”和“全国生态环境保护规划纲要”,为我国今后的生态环境恢复建设和保护提供了基本框架和政策保障。在这些纲要的实施过程中,首先需要将生态环境建设和保护落实到一定的地点或区域。这就提出了一个问题,怎样确定需要优先或重点开展生态环境建设和保护的地点或区域。进行生态环境的敏感性评价已经被认为是一种有效的方法^[2]。

生态环境敏感性是指生态系统对各种环境变异和人类活动干扰的敏感程度。即生态系统在遇到干扰时,生态环境问题出现的概率大小。在自然状况下,各种生态过程维持着一种相对稳定的耦合关系,保证着生态系统的相对稳定,而当外界干扰超过一定限度时,这种耦合关系将被打破,某些生态过程会趁机膨胀,导致严重的生态环境问题。所以,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。目前对生态敏感性的研究多集中在某一生态问题或国家尺度上的综合^[3~6],而对省一级尺度的研究较少。甘肃省地处中国三大自然地理区域的过渡区^[7],由于高山地形和干旱气候,生态环境非常敏感,特别是水土流失、沙漠化和土壤盐渍化等已经严重影响区域的可持续发展。为此,以甘肃省为例,利用甘肃省生态环境调查的资料和各种对甘肃省生态环境现状的调查和评价结果,通过单个因子分析和多因子综合评价相结合,对生态环境敏感

性进行了综合评价,明确生态环境敏感区域,为甘肃省生态环境建设和保护规划方案的制定提供生态学基础。

1 研究方法

生态环境问题的形成和发展往往是多个因子综合作用的结果。生态环境问题的出现或发生概率常常取决于影响生态环境问题形成的各个因子的强度、分布状况和多个因子的组合。因此,在生态环境敏感性评价时,常常采用多因子的综合方法^[8,9]。这里是基于生态环境问题形成机制上,对直接影响生态环境问题发生和发展的各自然因素进行综合。如水土流失,就考虑了降水、地形、土壤质地和植被覆盖度等与水土流失直接相关的因子。通过综合各影响因子分布图,采用 GIS 空间分析方法,得出各生态环境问题的敏感性分布图,然后,再进一步综合,得出甘肃省生态环境敏感性分布图。

根据甘肃省的实际情况,生态敏感性评价主要针对土壤侵蚀、沙漠化和盐渍化等生态问题。结合相应的现状评价标准,敏感性分为 5 级,即极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感、不敏感。生物多样性敏感性因涉及问题较多,空间资料暂时不全等原因,在此不作评价。

1.1 评价指标

1.1.1 水土流失敏感性 以通用水土流失方程(USLE)为基础,综合考虑降水、地形、植被与土壤质地等因素^[10],选取了降水冲蚀力 R 值、土壤质地、地形起伏度和植被类型等因子。其中, R 值以王万忠等计算的全国 125 个重点站的年 R 值为基础,利用 ArcView 的创建表面功能,采用样条函数内插法得到甘肃省 R 值分布图^[11];土壤质地依据《甘肃土种志》对各土种的描述,将质地特征输入甘肃土壤图属性表中;地形起伏度采用刘新华等的研究结果,在 1:100 万地形图上按 $5 \times 5 \text{ km}^2$ 的基本窗口提取地形起伏度^[12];植被类型以甘肃省 1:100 万植被图和 1:100 万土地利用图相互叠加校正的结果为依据确定。

1.1.2 沙漠化敏感性 考虑了气候的干燥程度、风力大小、植被覆盖和土壤状况,选用湿润指数、土壤质地、植被覆盖及起沙风的天数等来评价。植被覆盖以甘肃省生态环境现状调查完成的植被覆盖遥感分析图为依据;起沙风天数参照张国平等的方法^[13],依据各县气象资料获得。

1.1.3 盐渍化敏感性 土地盐渍化敏感性是指旱地灌溉土壤发生盐渍化的可能性。在评价时首先根据地下水位来划分敏感区域,甘肃省地下水位小于 2m 的区域都可能是盐渍化的敏感区域,按照甘肃省地下水资源图来确定其范围;在此基础上采用蒸发量/降雨量比值、地下水矿化度与地形等因素划分敏感性等级。资料来源分别是甘肃省地下水矿化度分布图和甘肃省地貌类型图。

各单因子敏感性等级按极敏感、高度敏感、中度敏感、轻度敏感和不敏感分别赋值为 9、7、5、3 和 1,在具体赋值时,考虑到实际中各因子与生态环境问题间的关系来确定其等级(表 1)。如在影响水土流失的因子中,降水冲蚀 R 值和地形起伏度与水土流失并不完全呈线性关系,是通过征求专家意见来确定其数值与敏感性等级之间的对应关系的。

1.2 综合方法

从单因子分析得出的生态环境敏感性,只反映了某一因子的作用程度,没有将生态环境敏感性的区域变异综合地反映出来。必须对上述各项因子分别赋值,再通过下面方法来计算敏感性指数:

$$SS_j = n \sqrt{\prod_{i=1}^n C_i}$$

式中, SS_j 为 j 空间单元生态环境敏感性指数; C_i 为 i 因素敏感性等级值, n 为因子数。然后根据分级标准来确定生态环境敏感性等级。根据上式,利用地理信息系统软件中的空间叠加分析功能,得到甘肃省各生态问题的综合敏感值图。根据综合敏感值,按表 2 的标准划分敏感性等级。

1.3 综合评价

由于不同生态环境问题之间是相互独立的,为了突出生态环境问题的敏感性,在对多个生态环境问题进行综合评价时,采取取更大值的方法,通过 ArcView 的空间分析功能实现^[14]。

上述研究数据: 100 万甘肃省地形图和行政区划图作为工作底图,将其他各专题图转化为相同比例尺,分别在 ArcInfo 和 ArcView 软件支持下进行空间叠加分析、敏感性分级、面积量算、图形输出。

与甘肃省水土流失现状对比,二者具有相对一致性。敏感性高的地区,基本上就是目前水土流失严重的地区。如极敏感分布区目前土壤侵蚀属极强度侵蚀;高度敏感地区属强度至中度侵蚀;中度敏感区为中度至微度侵蚀;而轻度和不敏感地区基本就是微度侵蚀。从机理分析,水土流失同时受自然因素和人类活动的影响,降雨、土壤特性、地形起伏以及自然植被情况等都是自然因素,因此敏感性高的地区,本身水土流失基数就大,加上人类活动干扰的影响,局部地区的植被破坏对该地区的水土流失会产生很大影响,特别是在坡度较陡的地区更是如此。同时,人类活动强度过大,还可能改变自然因子的特性,也进一步加剧了水土流失的强度。黄土高原地区是甘肃省人口密度最大的地区,长期的人类活动使自然植被几乎不复存在,取而代之的是易造成水土流失的农业植被,并使土壤性质发生变化,如原始的黑垆土被黄绵土取代,更易遭受侵蚀。因而敏感性高地区如果人类干扰强度较大,就很容易导致严重的水土流失。特别要注意这些地区的自然植被保护、恢复。特别是黄土高原沟壑区和黄土丘陵沟壑区是甘肃省重点水土流失区,同时也是甘肃省人口集中分布区和粮食主产区,控制人口,建立基本农田,退耕还林还草,保持水土,发展旱作农业是生态环境建设的重点任务。

2.1.2 土地沙漠化敏感性评价 甘肃省土地沙漠化极敏感地区面积占全省总面积的 0.8%,主要分布在安西县中部地区和肃北县的东南部;高度敏感区面积占 33.1%,分布于阿拉善高原的石羊河流域、黑河流域大部、河西走廊、北山地区大部;中度敏感区占总面积的 19.7%,分布于东阿尔金山、苏干湖盆地、肃北中部(南部辖区)、酒泉、高台、临泽、张掖南部、山丹、永昌、武威和古浪的北部、景泰、靖远、会宁等地,呈带状分布;轻度敏感区面积占 39.3%,包括祁连山区,陇东黄土高原沟壑区和陇中黄土丘陵沟壑区大部、陇南山地大部、甘南高原的西倾山等地;不敏感地区面积约占 7.1%,主要包括子午岭、甘南的南部、大夏河流域西南部、碌曲的北部、卓尼南部、迭部的北部、玛曲南部和西南部等地(表 3,图 1-b)。

2.1.3 土壤盐渍化敏感性评价 甘肃省土壤盐渍化没有极敏感区,高度敏感区主要分布在内流区,面积占 1.1%,零星见于疏勒河流域的敦煌东部、安西西部,黑河流域的酒泉、金塔和高台交界处,民勤中部等地,在靖远一带的黄土丘陵盆地也有分布;中度敏感区面积占 7.7%,分布于高度敏感区的外围,如疏勒河中下游,黑河中游地区,石羊河下游大部分地区及陇中黄土高原北部的盆地;轻度敏感区面积较大,占 58.9%,包括北山地区,东阿尔金山,苏干湖盆地,西祁连山,玛曲东部,陇中黄土丘陵沟壑区的中北部,陇东的环县等地;不敏感区面积也较大,占 32.3%,含东祁连山,甘南的大部,陇中黄土丘陵沟壑区南部,陇东黄土高原中南部等地区。(表 3,图 1-c)。

与土壤盐渍化现状对比,石羊河下游民勤地区,黑河中游张掖、高台、临泽一线以北及酒泉、金塔等地,疏勒河中下游安西、敦煌一带,这些地区既是土地盐渍化敏感性高的地区,同时也是土地盐渍化严重地区。敏感性高的地区本身对人类活动的承受力就低,而这些地区恰好是人为活动较频繁的地区,原生植被的破坏,土地的大量开垦,特别是不合理的耕作与灌溉制度加重了盐类在地表的聚集,导致盐渍化的加强。上述地区应该成为土壤盐渍化控制的重点。

表 3 不同类型生态环境敏感性的面积和比例(km²,%)

Table 3 Area and its percentage of sensitivity grade for each type of eco-environmental sensitivity					
生态环境问题 Eco-environmental problem	不敏感(1) Insensitive	轻度敏感(3) Less sensitive	中度敏感(5) Sensitive	高度敏感(7) More sensitive	极敏感(9) The most sensitive
水土流失 Water and soil loss	9096	224670	107787	111880	955
	2.0	49.4	23.7	24.6	0.21
土地沙漠化 Land desertification	32216	178728	89734	150338	3785
	7.1	39.3	19.7	33.1	0.8
土壤盐渍化 Soil salinization	146739	267764	34932	5366	—
	32.3	58.9	7.7	1.1	
敏感性综合 Integrated value	—	45480	143262	261054	5002
		10	31.5	57.4	1.1

万方数据

2.1.4 综合敏感性区域分布 将土地沙漠化、水土流失和盐渍化敏感性进行综合评价(表 3,图 1-d),可以

看出,极敏感区占 1.1%,包括陇东黄土高原的马莲河流域,陇中黄土高原中东部,安西中部和肃北东南部;高度敏感区面积达 57.4%,分布在北山地区,河西走廊西部,黑河流域,石羊河流域,陇中黄土丘陵沟壑区的大部,陇东黄土高原除子午岭以外的大部地方,大夏河流域,玛曲和碌曲的部分地方,陇南山地的山间盆地;中度敏感区面积占 31.5%,包括陇南山地大部,甘南高原南部,河西走廊中东部,西祁连山,苏干湖盆地等;轻度敏感地区面积占 10%,分布于祁连山,陇南和甘南的局部;甘肃几乎没有不敏感地区。

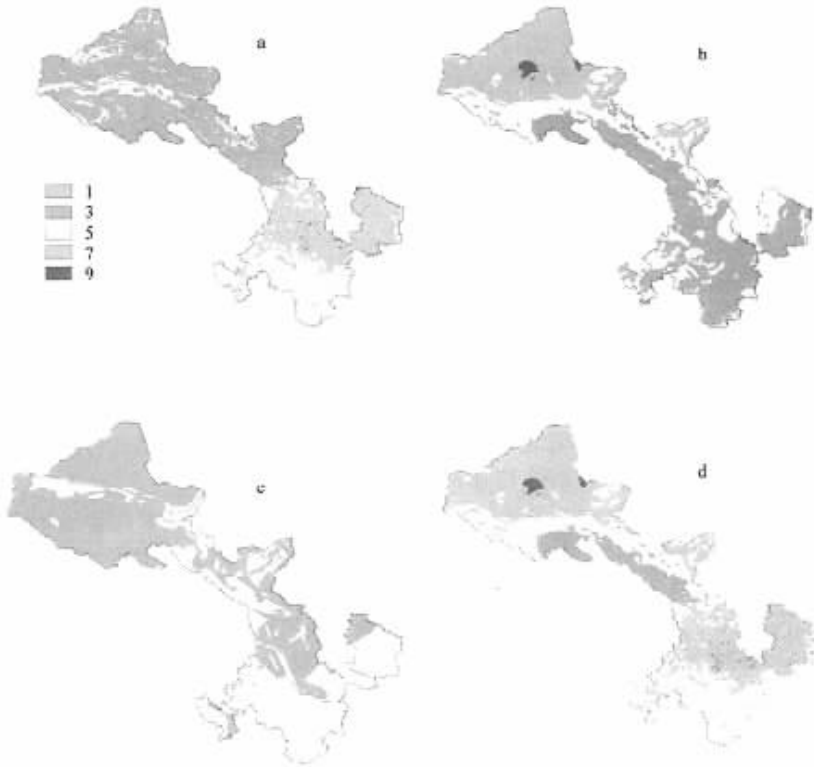


图 1 甘肃省生态环境敏感性分布图

Fig. 1 Distribution of sensitivity of eco-environment in Gansu Province

a. 水土流失敏感性 sensitivity of water erosion; b. 土地沙漠化敏感性 sensitivity of land desertification; c. 土壤盐渍化敏感性 sensitivity of salinization; d. 生态环境综合敏感性 integrated assessment on sensitivity to eco-environment

1. 不敏感 insensitive; 3. 轻度敏感 less sensitive; 5. 中度敏感 sensitive; 7. 高度敏感 more sensitive; 9. 极敏感 the most sensitive

2.2 主要地区的敏感性特征

甘肃省生态环境大多数地区为中-高度敏感,反映了生态环境的特殊性及人类活动深刻的影响。根据敏感性大小,可划分以下区域:

(1) 陇东黄土高原 以土壤侵蚀为主要生态环境问题,属高度敏感区,子午岭为中度敏感地区,马莲河流域为极敏感地区。

(2) 陇中黄土丘陵沟壑区 属生态环境高度敏感-极敏感区,人口密度大,人类活动历史悠久,水土流失严重。

(3) 陇南高原山地和土石山区 为生态环境高度敏感区,以水土流失为主,并同时存在风蚀沙漠化问题和土壤盐渍化问题。

(4) 陇南山地 为生态环境中度敏感区,其中徽成盆地、西礼盆地为高度敏感地区。敏感因子是土壤侵蚀。

(5) 甘南高原 为生态环境中度敏感-高度敏感区,其北部地处甘南高原向黄土高原和祁连山的过渡带,地形起伏大,河谷深切,生态环境高度敏感,敏感因子是水土流失。碌曲、玛曲高原生态环境为中度敏感,西倾山和黄河阶地一带为高度敏感,敏感因子是土地沙漠化和土壤侵蚀。

(6) 阿拉善高原 生态环境高度敏感区,敏感因子为土地沙漠化和土壤盐碱化。

(7) 河西走廊中东部 生态环境中度敏感,敏感因子为盐渍化和土地沙漠化。

(8) 祁连山地 生态环境轻度敏感区,敏感因子是水土流失。

(9) 河西走廊西部 生态环境高度敏感区,以土地沙漠化、土壤盐渍化为主。

(10) 阿尔金山-西祁连山地 生态环境中度敏感区,敏感因子是土地沙漠化。

(11) 苏干湖盆地 生态环境中度敏感,以土地沙漠化为主。

(12) 北山山地 生态环境高度敏感区,首要敏感因子为土地沙漠化。

上述不同的区域,具有各自的敏感性特征,主导因素也不同,有些地区为单一的生态环境问题,有些地区则多个生态环境问题同时并存。应根据各区的特点采取不同的管理措施,实施不同的生态建设模式。

3 结论

我国生态环境问题的严重性已经得到了广泛的认识,并且国家也采取了一系列的生态恢复和治理措施,并取得了一定的成效,但是在生态环境综合整治中,由于在省域尺度上,还没有能够比较准确地掌握生态环境敏感性区域的空间分布,在制定宏观规划和宏观监督方面存在明显的不足。本研究进行的甘肃省生态环境敏感性的综合评价,通过因子分析和综合,辨识出了甘肃省主要生态环境敏感区域,可以作为生态环境保护和管理决策的科学根据。

在该研究中,结合甘肃省的实际情况,从方法论的角度,对生态环境敏感性的定义和评价方法进行了探讨,并将敏感性评价的结果与甘肃省生态环境问题的现状进行了比较,说明该方法有较好的可操作性。

从评价结果看,甘肃省的生态环境敏感性区域分布比较广泛,极敏感和高度敏感区域占全省的总面积的 58.5%。其中水土流失极敏感和高度敏感区域占 24.8%,主要集中在黄土高原,甘南高原北部,陇南山地的西礼盆地、徽成盆地等地区;沙漠化极敏感和高度敏感区域占 33.9%,主要集中在安西中部地区和肃北的东南部,石羊河流域和弱水流域,黄土高原北部;土壤盐渍化高度敏感区域占 1.1%,主要集中在疏勒河中下游、黑河中游以及石羊河下游。加强这些极敏感区域的保护和管理,应该是甘肃省生态环境保护与建设的重中之重。

References:

- [1] The Natural Conservation Department of the Ministry of Environmental Conservation Report of Ecological problems in China. Beijing, China Environmental Science Press, 1999.
- [2] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(1): 9~12.
- [3] Wang X K, Ouyang Z Y, Xiao H, et al. Distribution and division of sensitivity to water-caused soil loss in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1), 14~19.
- [4] Ye X M, Hao J M, Duan L, et al. Mapping sensitivity of surface waters to acidification in China. *Environmental Science*, 2002, **23**(1): 16~21.
- [5] Shi D M, Liang Y. Evaluation and conservation of fragile ecological environment in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, **16**(1): 6~10.
- [6] Hornung M, Bull K R, Cresser M, et al. The sensitivity of surface waters of Great Britain to acidification predicted from catchment characteristics. *Environmental Pollution*. 1995, **87**: 207~214.
- [7] Wu G 万方数据 *Natural Regionalization in Gansu Province*. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1998.

- [8] Sung Ryong Ha , Dhong D Jung , Cho Hee Yoon . A renovated model for spatial analysis of pollutant runoff loads in agricultural watershed . *Wat. Sci. Tech.* , 1998 , **38**(10) : 207~214 .
- [9] Cassel-Gintz M , Petschel-held G . GIS-based assessment of the threat to world forests by patterns of non-sustainable civilization nature interaction . *Journal of Environmental Management* . 2000 , **59** : 279~298 .
- [10] Renard K G , Foster G R , Weesies G A , *et al.* Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) , Agricultural Handbook No. 537 , United States Department of Agriculture , Washington , 1997 .
- [11] Wang W Z , Jian J Y . Quantitative assessment on soil erosion factors in China . *Bulletin of Soil and Water Conservation* , 1996 , **16**(5) : 1~20 .
- [12] Liu X H , Yang Q K , Tang G A . Extraction and Application of relief of China based on DEM and GIS method . *Bulletin of Soil and Water Conservation* , 2001 , **21**(1) : 57~60 .
- [13] Zhang G P , Zhang Z X , Liu J Y . Spatial distribution of Aeolian erosion of soil and its driving factors in China . *Acta Geographica Sinica* , 2001 , **56**(2) : 146~158 .
- [14] ESRI . *ArcView GIS* , Environmental System Research Inc. , USA , 1996

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局自然保护司 . 中国生态问题报告 . 北京 : 中国环境科学出版社 , 1999 .
- [2] 欧阳志云 , 王效科 , 苗鸿 . 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究 . *生态学报* , 2000 , **20** (1) : 9~12 .
- [3] 王效科 , 欧阳志云 , 肖寒 , 等 . 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究 . *生态学报* , 2001 , **21**(1) : 14~19 .
- [4] 叶雪梅 , 郝吉明 , 段雷 , 等 . 中国地表水酸化敏感性的区划 . *环境科学* , 2002 , **23** (1) : 16~21 .
- [5] 史德明 , 梁音 . 我国脆弱生态环境的评估与保护 . *水土保持学报* , 2002 , **16**(1) , 6~10 .
- [7] 伍光和 , 江存远主编 . 甘肃省综合自然区划 . 兰州 : 甘肃科学技术出版社 , 1998 .
- [11] 王万忠 , 焦菊英 . 中国土壤侵蚀因子定量评价研究 . *水土保持通报* , 1996 , **16**(5) : 1~20 .
- [12] 刘新华 , 杨勤科 , 汤国安 . 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用 . *水土保持通报* , 2001 , **21**(1) : 57~60 .
- [13] 张国平 , 张增祥 , 刘纪远 . 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析 . *地理学报* , 2001 , **56**(2) : 146~158 .