

基于 PSR 框架, 针对土壤侵蚀 小流域的土地质量评价

郭旭东¹, 邱 扬², 连 纲^{1,3}, 王 静¹, 张爱萍⁴

(1. 中国土地勘测规划院 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100029; 2. 北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100081;
3. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 4. 河北省张北县一中, 张北 076450)

摘要: 土壤侵蚀与水土流失是我国土地退化的重要形式。建立基于“压力-状态-响应(PSR)”模式的土地质量指标体系能够比较明确反映出土地质量变化的因果关系, 从而有助于决策者采取合适的土地政策和管理措施, 进行退化土地的恢复重建。在我国水土流失较为严重的黄土高原丘陵沟壑区, 选取安塞县大南沟小流域进行案例分析, 分别以栅格(10m×10m)和小流域整体为评价对象建立起基于 PSR 框架, 针对土壤侵蚀的土地质量指标体系。前者(以栅格为评价对象)的压力指标主要为坡度, 状态指标包括土壤侵蚀强度、土壤肥力和植被盖度, 响应指标为土地利用类型; 后者(以小流域整体为评价对象)指标包括 3 个方面, 即基于栅格计算的指标、统计指标和格局指标。具体的压力指标包括地形压力、耕地压力、农作物收入压力以及格局压力等指标, 状态指标包括土壤侵蚀强度、土壤肥力、植物盖度、流域出口水土流失和格局状态指标, 响应指标包括非农地面积比重和梯田占农地面积比重等指标。以小流域 1998 年土地利用图为基础, 运用模型模拟和统计分析对小流域整体和小流域内土地质量的相对差异进行了评价。结果表明, 小流域平均坡度 27.85°, 最大坡度高达 59.39°, 耕地平均坡度 24.56°, 耕地面积比重 42.8%, 农作物收入比重 63%, 小流域整体压力评价等级为 5 等; 小流域平均土壤侵蚀强度为 36.39t/hm², 流域出口的侵蚀总量为 6.03t/hm², 土壤肥力低, 植被盖度平均为 2.83%; 整体状态评价等级为 4 等; 小流域非耕地面积比重为 57.2%, 梯田占耕地面积比重只有 4.01%, 小流域整体响应评价等级为 4 等。小流域内部土地质量的空间异质性较低, 流域面积一半的土地质量等级均为 4 等。不同土地利用类型的土地质量差别较大, 质量由高到低依次为林地/灌木林、荒草地、果园/经济林、休闲地、耕地。该研究可为流域土地规划和不同流域土地质量的比较提供一定的科学依据。

关键词: “压力-状态-响应”框架; 土地质量; 土壤侵蚀; 指标体系

Land quality indicators based on “Press-State-Response” framework at catchment for soil degradation by water erosion

GUO Xu-Dong¹, QIU Yang², LIAN Gang^{1,3}, WANG Jing¹, ZHANG Ai-Ping⁴ (1. China Land Surveying & Planning Institute, Key Laboratory of Land Use, MLR, Beijing 100029, China; 2. Department of Resources and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China; 4. No. 1 Middle School, Zhangbei County, Hebei Province, Zhangbei 076450, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 1884~1894.

Abstract: Soil erosion is one of the most important land degradation in China. Land quality indicators based on “Press-State-Response” framework can explore distinctively the reason and the results of land quality changes, which will help administrator to adopt suitable land policy and management measures to rehabilitate degraded land and improve land quality. Respectively taking cell (10m×10m) and whole catchment as evaluation unit, Land quality indicators based on PSR framework for soil

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40201004, 40201003); 国家国土资源部百名优秀青年科技人才计划资助项目

收稿日期: 2004-03-27; 修订日期: 2004-07-03

作者简介: 郭旭东(1972~), 男, 辽宁铁岭人, 博士, 副研究员, 主要从事景观生态学、土地利用变化和土地质量研究。E-mail: sam9560@vip.sina.com.cn

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China(No. 40201004, 40201003); Excellent young Scientists of the Ministry of Land and Resources

Received date: 2004-03-27; **Accepted date:** 2004-07-03

Biography: 万方数据 GUO Xu-Dong, Associate professor, mainly engaged in landscape ecology, land use changes and land quality.

degradation by water erosion were build up at Da Nangou catchment, Shaanxi province, hilly area in Loess Plateau. In the former land quality indicator (cell as evaluation unit), slope gradient is used as a press indicator, state indicators include soil erosion intensity, soil fertility and vegetation cover, response indicator is the land use type. As for the latter (whole catchment as evaluation unit), the press indicators include topography, cultivation, crop income and land use pattern; state indicators include soil erosion intensity, soil fertility, vegetation cover and soil and water loss indicators at catchment exit; response indicators include the proportion of the area of non-farmland (forest/shrub + grassland + fallow) to whole land and terrace land to whole farmland. Land quality status of the catchment were evaluated based on land use in the year of 1998 by the application of model simulating and statistical analysis. Average slope gradient in the small catchment is 27.85° , the maximum gradient is 59.39° , the average gradient for farmland is 24.56° , the proportion of the area of farmland to whole land is 42.8% and the income proportion from crop is about 63%. We divide the land quality of the catchment into six grade and the pressure evaluation is fifth; the average soil erosion intensity and the total erosion is respectively 36.39t/ha and 6.03t/ha at the catchment exit. The average vegetation cover is 2.83%; the state grade is fourth; the area proportion of non-farmland to whole land is 57.2% and the terrace land to whole farmland is 4.01%, the response grade is also fourth. Spatial heterogeneity of land quality at catchment is low, the fourth grade land occupied almost the percent 50 to the total catchment area. Land quality is different among land use types. The order from high to low of land quality is respectively forest/shrub, grassland, orchard/economic forest, fallow and farmland. The results will provide some useful information for land planning in valley and land quality comparison among different valleys.

Key words: PSR framework; land quality; soil erosion; indicators

文章编号:1000-0933(2004)09-1884-11 中图分类号:F301.24,Q149,S154.1 文献标识码:A

在国际土地管护已经逐步从数量管护转向生态和质量管护的大背景下,考虑到我国土地退化的严峻形势,建立我国针对具体土地退化问题的土地质量评价指标体系显得尤为迫切和重要^[1]。以“压力-状态-响应(Press-State-Response, PSR)”为框架的土地质量指标体系的核心思想是通过“压力-状态-响应”这样一个反映土地质量变化因果关系的框架,将指标纳入土地管理和政策制订的实践中^[2,3],实现土地资源的可持续利用。目前,国际上已经建立起针对 7 个具体的土地退化问题的土地质量指标体系。包括土壤侵蚀、土壤肥力降低、森林开垦与森林退化、牧区土地退化、地下水位下降、盐碱化与水浸^[4]。众多学者也从不同角度对不同景观类型的土地压力、状态和响应指标进行了一定的研究^[5~8]。和国外相比,我国土地质量的研究还缺乏系统性,也缺乏长期观测的数据用于土地质量评价中。本研究的主要目的是建立起针对土壤侵蚀与水土流失的,以“压力-状态-响应”为框架的土地质量评价指标体系,以期为流域土地的合理规划提供科学依据,同时为构建区域尺度的土地质量指标奠定基础。

1 研究区域简介

本研究的研究区域为陕西省安塞县大南沟小流域。有关小流域的详细情况请见相关文献^[9,10]。

2 研究方法

2.1 土地质量评价指标体系的原则

按照“压力-状态-响应”模式建立指标体系,在指标选取时,主要遵循下述原则:

(1)针对性 在黄土丘陵区,土壤侵蚀与水土流失是最为严重的环境问题。因此,所有指标的选择都是针对土壤侵蚀与水土流失。

(2)直接性 尽量选择可以直接反映土壤侵蚀和土地质量的影响因子。

(3)动态性 所选择的指标,可以反映土地质量的时间变化

(4)空间异质性 选择指标要尽可能反映土地质量的空间变化。

(5)可扩充性 所构建的指标体系是分层次的,在不同层次下,可以进行指标的增加和删减。

2.2 评价方法

分别以栅格(10m×10m)和小流域整体为单位,建立起土地质量评价指标体系,在小流域 1998 年土地利用图基础上,进行土地质量评价。运用多元线性回归的方法,建立土壤有机质、全氮和全磷以及植被盖度的空间预测模型^{①②},通过 PCRaster 2.0 平台上得到每个栅格的土壤有机质、全氮、全磷和植被盖度指标。利用 LISEM 模型模拟小流域出口及单元的土壤侵蚀情况^[11]。

① 邱扬. 黄土丘陵区流域土地质量的时空变异及其环境效应. 中国科学院生态环境研究中心博士学位论文. 2001

② 郭旭东,邱扬. 我国西部地区土地质量评价指标体系研究. 国土资源部土地管理专项项目报告. 2003

采用综合评价方法,将压力、状态和响应等指标分级赋值,取各指标的平均值作为最后的压力、状态和响应得分。计算三者的平均分,作为土地质量的最后得分,根据得分,赋予土地质量的相应等级。

3 结果与讨论

3.1 小流域单元(栅格)土地质量评价

3.1.1 压力评价 表 1 是小流域单元(栅格)土地质量评价指标体系与评价方法。坡度是引起黄土高原丘陵沟壑区水土流失的直接压力,选取坡度作为压力指标。通过 1 : 10 000 的 DEM 图,在 PCRaster 2.0 平台上,生成每个像元的坡度图。

表 1 大南沟小流域土地单元(栅格)质量指标体系及评价方法

Table 1 Land quality indicators based on PSR framework for cell as evaluation unit and evaluation methods

小流域土地单元质量综合得分: $UQ_j = (UP_j + US_j + UR_j) / 3$ Integrated score of land quality for cell as evaluation unit: $UQ_j = (UP_j + US_j + UR_j) / 3$
小流域土地单元质量得分评级: U_j Classification of land quality for cell as evaluation unit: U_j
1 等[5.5, 6 分]; 2 等[4.5, 5.5 分]; 3 等[3.5, 4.5 分]; 4 等[2.5, 3.5 分]; 5 等[1.5, 2.5 分]; 6 等[1, 1.5 分] First class [5.5, 6 score]; Second class [4.5, 5.5 score]; Third class [3.5, 4.5 score]; Fourth class [2.5, 3.5 score]; Fifth class [1.5, 2.5 score]; Sixth class [1, 1.5 score]
1. 小流域土地单元压力指标得分: $UP_j = \sum (UP_{ij}) / mp = UP_{1j}$ Integrated score of press indicator: $UP_j = \sum (UP_{ij}) / mp = UP_{1j}$
1.1 UP_{1j} : 坡度(度)分级得分 Score for slope gradient (degree) grade: 6 [0, 5°); 5 [5, 10°); 4 [10, 15°); 3 [15, 20°); 2 [20, 25°); 1 [25°, +∞)
2. 小流域土地单元状态指标得分: $US_j = \sum (US_{ij}) / ms = (US_{1j} + US_{2j} + US_{3j}) / 3$ Integrated score of state indicator: $US_j = \sum (US_{ij}) / ms = (US_{1j} + US_{2j} + US_{3j}) / 3$
2.1 US_{1j} : 土壤侵蚀强度 (t/hm ²) 分级得分 Score for soil erosion intensity (t/hm ²) grade: 6 [0~2.5 t/hm ²); 5 [2.5~10 t/hm ²); 4 [10~25 t/hm ²); 3 [25~100 t/hm ²); 2 [100~1000 t/hm ²); 1 [1000 t/hm ² , +∞)
2.2 US_{2j} 土壤肥力 Soil fertility: $US_{2j} = (USOM_j + USTN_j + USTP_j) / 3$ $USOM_j$: 有机质(%) 分级得分 Score for organic matter grade: 1 [0, 0.30%); 2 [0.30%, 0.60%); 3 [0.60%, 0.90%); 4 [0.90%, 1.10%); 5 [1.10%, 1.30%); 6 [1.30%, +∞) $USTN_j$: 全氮(%) 分级得分 Score for total nitrogen grade: 1 [0, 0.020%); 2 [0.020%, 0.035%); 3 [0.035%, 0.050%); 4 [0.050%, 0.065%); 5 [0.065%, 0.080%); 6 [0.080%, +∞) $USTP_j$: 全磷(%) 分级得分 Score for total phosphorus grade: 1 [0, 0.050%); 2 [0.050%, 0.055%); 3 [0.055%, 0.060%); 4 [0.060%, 0.065%); 5 [0.065%, 0.070%); 6 [0.070%, +∞)
2.3 US_{3j} : 植物盖度(%) 分级得分 Score for vegetation cover (%) grade: 1 [0, 15%); 2 [15%, 30%); 3 [30%, 45%); 4 [45%, 60%); 5 [60%, 75%); 6 [75%, 100%]
3. 小流域土地单元响应指标得分: $UR_j = \sum (UR_{ij}) / mr = UR_{1j}$ Score of response indicator: $UR_j = \sum (UR_{ij}) / mr = UR_{1j}$
3.1 UR_{1j} : 土地利用类型得分 Score for different land uses: 1. 农地 Farm land; 2. 休闲地 Fallow; 3. 果园/经济林 Orchard/economic forest; 4. 荒草地 Grassland; 5. 林地/灌木地 Forest/shrub

从表 2 和图 1 可知,大南沟小流域的地形陡峭,平均坡度为 27.85 度,最大高达 59.39 度。平均变异系数很高(39.46%),表明该小流域地形破碎。坡度大于 25 度的陡坡占据了 61.78%的土地面积,小于 15 度的土地面积仅占 15.02%,其中小于 5 度的土地只占 1.67%。显然,大南沟小流域这种陡峭的地形格局,造成严重的土地压力,平均土地质量得分只有 1.87 分。

表 2 小流域土地利用的坡度分级面积比重(%)

Table 2 Area proportion of slope grade for different land uses at catchment (%)

土地利用类型 Land use	1 分 1 score (>25°)	2 分 2 score (21~25°)	3 分 3 score (16~20°)	4 分 4 score (11~15°)	5 分 5 score (6~10°)	6 分 6 score (0~5°)	合计 Sum
林地/灌木地 Forest/shrub	70.26	12.82	9.04	5.79	1.74	0.34	13.37
果园/经济林 Orchard/Economic forest	56.40	14.30	13.72	9.07	5.47	1.05	2.44
荒草地 Grassland	75.33	9.58	6.38	5.05	2.52	1.14	41.39
休闲地 Fallow	54.13	14.60	13.54	10.76	4.89	2.07	7.25
耕地 Farmland	44.75	16.29	14.27	13.14	8.82	2.73	35.55
合计 Sum	61.78	12.88	10.24	8.54	4.90	1.67	100.00

3.1.2 状态评价 状态指标包括土壤侵蚀、土壤肥力和植被盖度(表 1)。

① 土壤侵蚀(US_{1j}) 最为直接的状态指标就是土壤侵蚀强度。由于 LISEM 模型对侵蚀强度的空间预测能力较强,运用

LISEM 模型模拟得到空间上每个像元的土壤侵蚀强度^[11,12]。

由表 3 可知,整个小流域的土壤侵蚀强度较高,平均为 36.39t/hm²。空间上土壤侵蚀强度的差异较大,最小仅 0.0153 t/hm²,最大达 1861 t/hm²,平均变异系数高达 225.3%。其中,轻度侵蚀(0~2.5t/hm²)占 30.54%,而重度及其以上侵蚀强度(>25t/hm²)占了 37.08%(表 4)。不同土地利用类型的平均土壤侵蚀强度的大小顺序为:荒草地>果园/经济林地>休闲地>农地>林地/灌木地(表 4)。

②土壤肥力评价 表层土壤(0~20cm)的有机质含量(%),全氮含量(%) and 全磷含量(%)作为土壤肥力的评价指标(表 1)。通过土壤养分的空间预测模型得到每一栅格土壤养分状况,整个小流域的土壤有机质平均含量 0.73%,土壤有机质在空间上差异较大,最小只有 0.27%,最大达 1.20%,变异系数为 31.56%;土壤全氮平均含量为 0.045%,全氮含量在空间上的差异也较大,最小为 0.022%,最大也只有 0.067%,变异系数为 23.12%。小流域的土壤全磷平均含量为 0.0573%,整个小流域 75.99%的土壤全磷含量低于 0.060%。土壤全氮含量的空间异质性很低,最小为 0.0486%,最大也只有 0.0703%,变异系数仅为 6.45%。

从土地利用类型来看,有机质和全氮含量顺序大小为:荒草地>果园/经济林地>林地/灌木地>休闲地>耕地。而全磷含量顺序大小为:林地/灌木地>果园/经济林地>荒草地>耕地>休闲地。

根据表 1 的计算方法可以得到整个小流域土壤肥力平均得分 3.02 分,土壤肥力较低,土地质量为 4 等。土壤肥力得分的空间异质性较低,最小得分为 1.67 分,最大 5 分,变异系数仅为 20.68%(表 5)。整个小流域里,4 等及其以下土地占 73.75%。荒

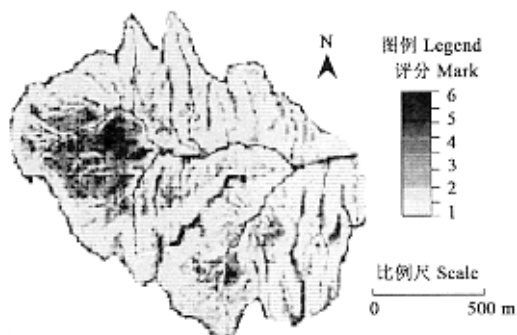


图 1 大南沟小流域坡度分级评分图

Fig. 1 Value for different slope grade of Da Nangou catchment

表 3 小流域土地利用的土壤侵蚀强度概况

Table 3 Soil erosion of land uses at catchment

土地利用类型 Land use	平均值(t/hm ²) Average value	最小值(t/hm ²) Min.	最大值(t/hm ²) Max.	标准差(t/hm ²)* S. d.	变异系数(%) C. v. *	样本数 Sample number
林地/灌木地 Forest/shrub	4.414	0.0153	1186	41.87	948.6	4711
果园/经济林 Orchard/economic forest	32.84	0.1296	953.5	52.04	158.5	860
荒草地 Grassland	58.74	0.0331	1861	110.5	188.1	14586
休闲地 Fallow	28.05	0.0909	1410	62.45	222.6	2555
耕地 Farmland	24.33	0.0378	1084	43.94	180.6	12525
合计 Sum	36.39	0.0153	1861	81.98	225.3	35237

* S. d. : Standard deviation; C. v. : Coefficient of variation

表 4 小流域土地利用的土壤侵蚀强度分级面积比重(%)

Table 4 Area proportion of soil erosion grade for different land uses at catchment (%)

土地利用类型 Land use	6分 6 score (0~2.5t/hm ²)	5分 5 score (2.5~10t/hm ²)	4分 4 score (10~25t/hm ²)	3分 3 score (25~100t/hm ²)	2分 2 score (100~1000t/hm ²)	1分 1 score (>1000t/hm ²)	合计 Sum
林地/灌木地 Forest/Shrub	96.73	0.66	0.53	0.98	1.04	0.06	13.37
果园/经济林 Orchard/economic forest	13.49	17.67	25.47	38.14	5.23	0.00	2.44
荒草地 Grassland	18.51	7.08	17.32	43.59	13.26	0.24	41.39
休闲地 Fallow	36.01	9.43	21.41	28.85	4.19	0.12	7.25
耕地 Farmland	19.70	26.20	26.79	23.37	3.93	0.02	35.55
合计 Sum	30.54	13.45	18.93	29.50	7.46	0.12	100.00

表 5 小流域土地利用的土壤肥力得分概况

Table 5 The value for soil fertility of land uses at catchment

土地利用类型 Land use	平均值(分) Average	最小值(分) Min.	最大值(分) Max.	标准差(分) S. d.	变异系数(%) C. v.	样本数 Sample number
林地/灌木地 Forest/shrub	3.23	2.33	4.00	0.32	10.04	4711
果园/经济林 Orchard/economic forest	3.04	2.33	3.67	0.21	6.99	860
荒草地 Grassland	3.47	2.33	5.00	0.51	14.59	14586
休闲地 Fallow	2.56	2.00	3.67	0.38	14.86	2555
耕地 Farmland	2.49	1.67	3.67	0.38	15.40	12525
合计 Sum	3.02	1.67	5.00	0.62	20.68	35237

草地的 2 等和 3 等地所占的面积很大(56.99%),林地/灌木地次之(19.61%),但是,在果园/经济林地、休闲地和耕地上,其 2 等和 3 等地都不到 0.5%(表 6)。

③植物盖度($US3j$) 以土地利用和地形因子为自变量,构建大南沟小流域生长季平均植物盖度的空间预测模型。根据植物盖度的空间预测模型,结合土地利用图,可知:整个小流域的植物盖度为 26.83%,植物盖度的空间异质性较高,最小 0.001%,最大 77.52%,变异系数为 61.2%(表 7)。整个小流域里,植物盖度大于 45%的土地面积只占整个小流域的 13.44%(表 8)。

不同土地利用类型的平均植物盖度的大小顺序为:林地/灌木地(59.11%)>荒草地(26.64%)>果园/经济林地(26.12%)>耕地(17.40%)>休闲地(14.82%)(表 8)。

表 6 小流域土地利用的土壤肥力分等面积比重(%)

Table 6 Area proportion of soil fertility grade for different land uses at catchment (%)

土地利用类型 Land use	1 等 First grade [5.5, 6.0 分]	2 等 Second grade [4.5, 5.5 分]	3 等 Third grade [3.5, 4.5 分]	4 等 Fourth grade [2.5, 3.5 分]	5 等 Fifth grade [1.5, 2.5 分]	6 等 Sixth grade [1, 1.5 分]	合计 Sum
林地/灌木地 Forest/shrub	0.00	0.00	19.61	78.12	2.27	0.00	13.37
果园/经济林 Orchard/economic forest	0.00	0.00	0.35	99.53	0.12	0.00	2.44
荒草地 Grassland	0.00	1.62	55.38	41.95	1.06	0.00	41.39
休闲地 Fallow	0.00	0.00	0.20	54.29	45.52	0.00	7.25
耕地 Farmland	0.00	0.00	0.02	45.19	54.79	0.00	35.55
合计 Sum	0.00	0.67	25.58	50.24	23.52	0.00	100.00

表 7 小流域土地利用的植物盖度概况

Table 7 The Vegetation cover of land use at catchment

土地利用类型 Land use	平均值(%) Average	最小值(%) Min.	最大值(%) Max.	标准差(%) S. d.	变异系数(%) C. v.	样本数 Sample number
林地/灌木地 Forest/shrub	59.11	41.40	77.52	8.201	13.87	4711
果园/经济林 Orchard/economic forest	26.12	9.47	44.51	8.838	33.83	860
荒草地 Grassland	26.64	5.53	47.56	9.654	36.24	14586
休闲地 Fallow	14.82	0.001	33.02	8.236	55.56	2555
耕地 Farmland	17.40	0.001	39.17	9.752	56.04	12525
合计 Sum	26.83	0.001	77.52	16.42	61.2	35237

表 8 小流域土地利用的植物盖度的分级面积比重(%)

Table 8 Area proportion of vegetation cover grade of land use at catchment (%)

土地利用类型 Land use	1 分 1 score [0, 15%)	2 分 2 score [15%, 30%)	3 分 3 score [30%, 45%)	4 分 4 score [45%, 60%)	5 分 5 score [60%, 75%)	6 分 6 score [75%, 100%]	合计 Sum
林地/灌木地 Forest/shrub	0.00	0.00	3.44	48.99	46.34	1.23	13.37
果园/经济林 Orchard/economic forest	13.02	54.88	32.09	0.00	0.00	0.00	2.44
荒草地 Grassland	10.39	51.49	36.84	1.28	0.00	0.00	41.39
休闲地 Fallow	46.85	50.14	3.01	0.00	0.00	0.00	7.25
耕地 Farmland	45.87	41.09	13.05	0.00	0.00	0.00	35.55
合计 Sum	24.32	40.89	21.35	7.08	6.20	0.16	100.00

④状态综合评价 根据表 1 的计算方法,得到小流域所有土地单元的土地质量状态得分平均为 3.21 分(表 9)。图 2 为大南沟小流域 1998 年土地质量状态得分等级分布图,从图 2 和表 10 可知,小流域 4 等及 4 等以下土地面积占总土地面积的比例高达 73.31%,土地质量状态较低。林地/灌木地的土地状态最好,高居 2 等;其他 4 类土地利用均属 4 等。

3.1.3 响应评价 根据每个像元的土地利用方式,确定其响应指标得分。图 3 为小流域 1998 年土地质量响应得分等级分布图,整个小流域土地质量响应得分平均为 3.90,属 3 等。一般认为,林地/灌木地的水土保持效果最为显著,土壤肥力较高,因而其土地质量较高;荒草地上荒草对地表的保护作用非常明显,因而水土保持较弱,具有较高的土地质量;果园/经济林地的经济效益虽然明显,但是因为其盖度极低,地表裸露,水土流失较严重;休闲地和耕地的地表覆盖度小,土层疏松,水土流失最为严重,因而土地质量最低(图 3)。

3.1.4 小流域土地单元质量综合评价 根据土地单元的压力评价得分、状态评价得分和响应评价得分,计算得到大南沟小流

域 1998 年土地利用的土地单元综合得分概况(表 11)。整个小流域的所有土地单元的土地质量综合得分平均为 2.99 分,土地质量为 4 等。由图 4 与表 12 可见,整个小流域土地质量 1 等和 2 等都极少见,土地质量 4 等最多,3 等和 5 等居中。土地单元(栅格)的土地质量最小得分为 1.56 分,最大 5.67 分,变异系数仅为 24.71%,空间异质性较低。整个小流域土地单元的土地质量低劣。林地/灌木地的土地质量级别最高,属 3 等;荒草地、果园/经济林地和休闲地次之,属 4 等;耕地的土地质量最差,为 5 等(表 12)。

表 9 小流域土地利用的状态指标得分概况

Table 9 State indicator value of land use at catchment

土地利用类型 Land use	平均值(分) Average	最小值(分) Min.	最大值(分) Max.	标准差(分) S. d.	变异系数(%) C. v.	样本数 Sample number
林地/灌木地 Forest/shrub	4.53	2.67	5.33	0.28	6.27	4711
果园/经济林 Orchard/economic forest	3.06	1.89	4.11	0.45	14.54	860
荒草地 Grassland	3.17	1.89	4.89	0.55	17.26	14586
休闲地 Fallow	2.85	1.78	4.22	0.42	14.64	2555
耕地 Farmland	2.84	1.56	4.11	0.45	15.91	12525
合计 Sum	3.21	1.56	5.33	0.72	22.44	35237

表 10 小流域土地利用状态分等面积比重(%)

Table 10 Area proportion of state grade for different land uses at catchment(%)

土地利用类型 Land use	1 等	2 等	3 等	4 等	5 等	6 等	合计 Sum
	First class [5.5, 6.0 分]	Second class [4.5, 5.5 分]	Third class [3.5, 4.5 分]	Fourth class [2.5, 3.5 分]	Fifth class [1.5, 2.5 分]	Sixth class [1, 1.5 分]	
林地/灌木地 Forest/shrub	0.00	55.04	43.83	1.13	0.00	0.00	13.37
果园/经济林 Orchard/economic forest	0.00	0.00	17.33	73.95	8.72	0.00	2.44
荒草地 Grassland	0.00	0.83	24.74	66.78	7.66	0.00	41.39
休闲地 Fallow	0.00	0.00	1.88	74.72	23.41	0.00	7.25
耕地 Farmland	0.00	0.00	6.56	67.98	25.46	0.00	35.55
合计 Sum	0.00	7.70	18.99	59.18	14.13	0.00	100.00

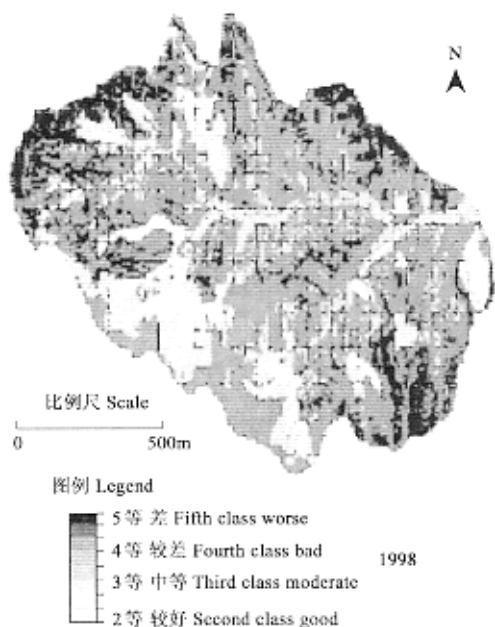


图 2 大南沟小流域 1998 年土地质量状态得分等级分布图

Fig. 2 Distribution for state grade of land quality in Da Nangou catchment in 1998

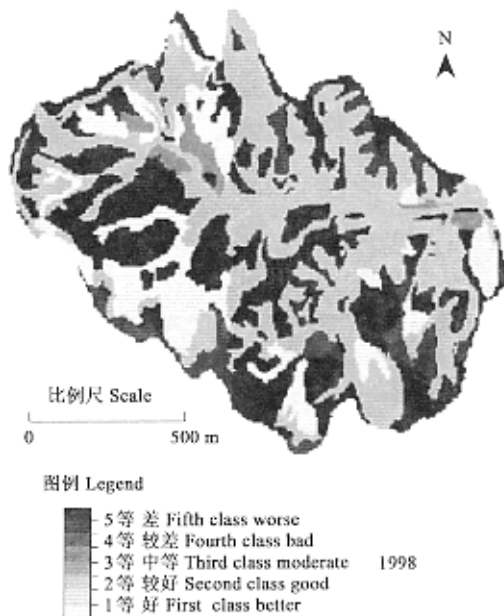


图 3 大南沟小流域 1998 年土地质量响应得分等级分布图

Fig. 3 Distribution for response grade of land quality in Da Nangou catchment in 1998

3.2 小流域整体土地质量评价指标体系与评价方法

为了比较不同流域土地质量状况,建立了小流域整体土地质量评价指标体系。选取的指标主要有三大类(表 13)。第 1 类指

标就是土地单元评价得分的平均值,第2类是各种要素(指标)的统计指标(包括平均值、比重等)等;第3类是几种要素(指标)的景观格局指标(包括斑块密度、均匀度和相对优势度)与坡度分级图偏离的程度。由于土地单元的平均得分在上面已经涉及到,这里主要讨论统计指标和格局指标的评价结果(图4)。

表 11 小流域土地利用的土地单元综合得分概况

Table 11 Land quality value of different land uses for cell as evaluation unit at catchment

土地利用类型 Land use	平均值(分) Average	最小值(分) Min.	最大值(分) Max.	标准差(分) S. d.	变异系数(%) C. v.	样本数 Sample number
林地/灌木地 Forest/shrub	4.03	3.22	5.67	0.36	8.86	4711
果园/经济林 Orchard/economic forest	3.01	2.30	4.70	0.51	16.98	860
荒草地 Grassland	3.23	2.63	5.26	0.45	14.01	14586
休闲地 Fallow	2.63	1.93	4.19	0.53	20.27	2555
耕地 Farmland	2.39	1.52	4.04	0.56	23.23	12525
合计 Sum	2.99	1.52	5.67	0.74	24.71	35237

表 12 小流域土地利用的土地单元综合评分的分等面积比重(%)

Table 12 Area proportion of land quality grade for different land uses at catchment(%)

土地利用类型 Land use	1等	2等	3等	4等	5等	6等	合计 Sum
	First class [5.5, 6.0分]	Scnd class [4.5, 5.5分]	Third class [3.5, 4.5分]	Fourth class [2.5, 3.5分]	Fifth class [1.5, 2.5分]	Sixth class [1, 1.5分]	
林地/灌木地 Forest/shrub	0.21	13.56	85.74	0.49	0.00	0.00	13.37
果园/经济林 Orchard/economic forest	0.00	0.81	17.44	74.77	6.98	0.00	2.44
荒草地 Grassland	0.00	2.52	16.82	80.66	0.00	0.00	41.39
休闲地 Fallow	0.00	0.00	7.55	36.44	56.01	0.00	7.25
耕地 Farmland	0.00	0.00	3.43	33.96	62.61	0.00	35.55
合计 Sum	0.03	2.87	20.62	49.99	26.49	0.00	100.00

3.2.1 小流域整体土地质量压力评价

(1)小流域整体压力统计指标 整个小流域的平均坡度约27.85°,农地面积比重高达42.8%,两项指标均得分1分;农地平均坡度约24.56°,得分2分。可见,大面积的陡坡耕作导致该小流域的土地质量压力很大,土地质量等级很低。采取参与式农户调查法,获得小流域两个村的农民收入及其组成^①。从整体上来说,整个小流域的人均年收入约1119元,其中农作物收入约662元(63%),而农业外收入只有214元(27%),土地质量得分只有2分。显然,农民的收入主要还是以土地耕作收入为主,对土地依赖性很强,因而给小流域的土地质量带来很大的压力。上述分析表明,整个小流域整体压力统计得分很低,只有2.01分,属5等。

(2)小流域整体压力格局指标 从表14可见,1998年土地利用图的斑块密度(0.003块/hm²)远远低于坡度分级图的斑块密度(8.605块/hm²),偏离高达99.97%,土地质量得分仅1分。这反映了农民在选择土地利用方式时,忽视坡度的空间变化,重视农地整齐和耕作方便。从以均匀度和优势度可以看出,土地利用图的均匀度和优势度和坡度分级图的偏离分别达到45.59%和31.86%,这表明,与坡度背景相比而言,土地利用的空间分布更加整齐均一。这种土地利用格局显然与该小流域的地形破碎的景观格局相差很远,很容易导致土壤侵蚀的空间累积,从而引发更为严重的土壤侵蚀。

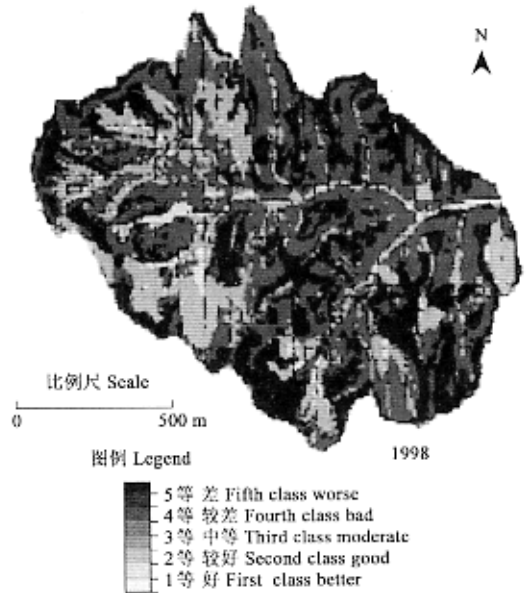


图 4 大南沟小流域 1998 年土地单元质量综合评分等级分布图
Fig. 4 Spatila distribution of land quality evaluation in Da Nangou catchment in 1998

① 郭旭东,邱扬.我国西部地区土地质量评价指标体系研究.国土资源部土地管理专项项目报告,2003

表 13 小流域整体土地质量评价指标体系及方法

Table 13 Land quality indicators based on PSR framework for whole catchment as evaluation unit and evaluation methods

小流域整体土地质量综合得分 Integrated score of land quality for catchment as evaluation unit; $TQ=(TP+TS+TR)$
小流域整体土地质量得分评级 Classification of land quality for catchment as evaluation unit; TQC
1 等[5.5~6 分];2 等[4.5~5.5 分];3 等[3.5~4.5 分];4 等[2.5~3.5 分];5 等[1.5~2.5 分];6 等[1~1.5 分]
First class [5.5, 6 score];Second class [4.5, 5.5 score];Third class [3.5, 4.5 score];Fourth class [2.5, 3.5 score];Fifth class [1.5, 2.5 score];Sixth class [1, 1.5 score]
1. 小流域整体压力指标得分 Integrated score of press indicator: $TP = \sum(Tpi)/mp = (TP1 + TP2 + TP3)/3$
小流域整体压力指标等级标准 Classification of press indicator: TPC
1 等[5.5~6 分];2 等[4.5~5.5 分];3 等[3.5~4.5 分];4 等[2.5~3.5 分];5 等[1.5~2.5 分];6 等[1~1.5 分]
First class [5.5, 6 score];Second class [4.5, 5.5 score];Third class [3.5, 4.5 score];Fourth class [2.5, 3.5 score];Fifth class [1.5, 2.5 score];Sixth class [1, 1.5 score]
1.1 $TP1$ 小流域土地单元压力平均得分 Average score of each cell for press indicator: $TP1 = UP = \sum(UPj)/n$
1.2 $TP2$ 小流域整体压力统计指标得分 Score of statistical press indicator:
$TP2 = \sum(TP2i)/mp2 = (TP21 + TP22 + TP23 + TP24)/4$
$TP21$ 平均坡度得分 Average score of slope gradient:
6 [0~5°];5 [5, 10°];4 [10, 15°];3 [15, 20°];2 [20, 25°];1 [25°, +∞)
$TP22$ 耕地面积比重(%)分级得分 Score for proportion of farmland grade:
6 [0, 10%];5 [10, 15%];4 [15, 20%];3 [20, 25%];2 [25, 30%];1 [30%, +∞)
$TP23$ 耕地平均坡度(度)分级得分 Score for grade of average slope gradient of farmland:
6 [0, 5°];5 [5, 10°];4 [10, 15°];3 [15, 20°];2 [20, 25°];1 [25, 90°)
$TP24$ 农作物收入比重(%)分级得分 Score for income proportion grade of agricultural production:
6 [0%~15%];5 [15%~30%];4 [30%~45%];3 [45%~60%];2 [60%~75%];1 [75%~100%]
1.3 $TP3$ 小流域整体压力格局指标得分(土地利用图与坡度分级图的偏离) Score of press indicator pattern for catchment(deviation of land use map and slope grade map): $TP3 = \sum(TP3i)/mp3 = (P31 + P32 + P33)/3$
$TP31$ 斑块密度偏离(%)分级得分 Score for deviation of patch density grade:
6 [0%, 15%];5 [15%, 30%];4 [30%, 45%];3 [45%, 60%];2 [60%, 75%];1 [75%, 100%]
$TP32$ 均匀度偏离(%)分级得分 Score for deviation of evenness grade:
6 [0, 15%];5 [15, 30%];4 [30, 45%];3 [45, 60%];2 [60, 75%];1 [75, 100%]
$TP33$ 相对优势度偏离(%)分级得分 Score for deviation of relative dominance grade:
6 [0, 15%];5 [15, 30%];4 [30, 45%];3 [45, 60%];2 [60, 75%];1 [75, 100%]
2. 小流域整体状态指标得分 TS (分) Integrated score of state indicator:
$TS = \sum(TSi)/ms = (TS1 + TS2 + TS3 + TS4)/4$
小流域整体状态指标等级标准 TSC Classification of state indicator:
1 等[5.5~6 分];2 等[4.5~5.5 分];3 等[3.5~4.5 分];4 等[2.5~3.5 分];5 等[1.5~2.5 分];6 等[1~1.5 分]
First class [5.5, 6 score];Second class [4.5, 5.5 score];Third class [3.5, 4.5 score];Fourth class [2.5, 3.5 score];Fifth class [1.5, 2.5 score];Sixth class [1, 1.5 score]
2.1 $TS1$ 小流域土地单元状态平均得分 Average score of each cell for state indicator:
$TS1 = US = \sum(USj)/n$
2.2 $TS2$ 小流域整体状态统计指标得分 Score of statistical state indicator:
$TS2 = \sum(TS2i)/ms2 = (TS21 + TS22 + TS23)/3$
$TS21$ 平均土壤侵蚀强度(t/hm^2)分级得分 Score for average soil erosion intensity grade:
6 [0, 2.5 t/hm^2];5 [2.5, 10 t/hm^2];4 [10, 25 t/hm^2];3 [25, 100 t/hm^2];2 [100, 1000 t/hm^2];1 [1000 t/hm^2 , +∞)
$TS22$ 平均土壤肥力得分 Score for average soil fertility grade: $TS22 = US2 = \sum(US2j)/n$
$TS23$ 平均植物盖度(%)分级得分 Score for vegetation cover grade:
1 [0, 15%];2 [15, 30%];3 [30, 45%];4 [45, 60%];5 [60, 75%];6 [75, 100%]
2.3 $TS3$ 小流域整体状态格局指标得分(土壤状态等级图与坡度分级图的偏离) Score of state indicator pattern for catchment(deviation of soil state map and slope grade map): $TS3 = \sum(TS3i)/ms3 = (TS31 + TS32 + TS33)/3$
$TS31$: 斑块密度偏离(%)分级得分 Score for deviation of patch density grade:
6 [0, 15%];5 [15%, 30%];4 [30%, 45%];3 [45%, 60%];2 [60%, 75%];1 [75%, 100%]
$TS32$: 均匀度偏离(%)分级得分 Score for deviation of evenness grade:
6 [0, 15%];5 [15%, 30%];4 [30%, 45%];3 [45%, 60%];2 [60%, 75%];1 [75%, 100%]
$TS33$ 相对优势度偏离(%)分级得分 Score for deviation of relative dominance grade:
6 [0, 15%];5 [15%, 30%];4 [30%, 45%];3 [45%, 60%];2 [60%, 75%];1 [75%, 100%]
2.4 $TS4$ 小流域整体流域出口水土流失得分 Score for soil erosion at catchment outlet:
$TS4 = \sum(TS4i)/ms4 = (TS41 + TS42 + TS43)/3$
$TS41$ 洪峰流速(l/s)分级得分 Score for velocity of flood peak grade:
6 [0, 3000 l/s];5 [3000, 4000 l/s];4 [4000, 5000 l/s];3 [5000, 6000 l/s];2 [6000, 7000 l/s];1 [7000 l/s , +∞)

续表 1

TS42 径流总量(m^3/hm^2)分级得分 Score of gross runoff grade:

6 [0, 10 m^3/hm^2]; 5 [10, 15 m^3/hm^2]; 4 [15, 20 m^3/hm^2]; 3 [20, 25 m^3/hm^2]; 2 [25, 30 m^3/hm^2]; 1 [30 m^3/hm^2 , $+\infty$)

TS43 侵蚀总量(ton/hm^2) Score of total soil erosion grade:

6 [0, 2.0 t/hm^2]; 5 [2.0, 3.0 t/hm^2]; 4 [3.0, 4.0 t/hm^2]; 3 [4.0, 5.0 t/hm^2]; 2 [5.0, 6.0 t/hm^2]; 1 [6.0 t/hm^2 , $+\infty$)

3. 小流域整体响应指标 TR (分) Score of response indicator:

$$TR = \sum (TR_i) / mr = (TR_1 + TR_2) / 2$$

小流域整体响应指标等级标准 TRC Classification for response indicator:

1等[5.5~6分]; 2等[4.5~5.5分]; 3等[3.5~4.5分]; 4等[2.5~3.5分]; 5等[1.5~2.5分]; 6等[1~1.5分]

First class [5.5, 6 score]; Second class [4.5, 5.5 score]; Third class [3.5, 4.5 score]; Fourth class [2.5, 3.5 score]; Fifth class [1.5, 2.5 score]; Sixth class [1, 1.5 score]

3.1 TR_1 小流域土地单元响应平均得分 Average score of each cell for response indicator:

$$TR_1 = UR = \sum (UR_j) / n$$

3.2 TR_2 小流域整体状态统计指标得分 Score of response indicator:

$$TR_2 = \sum (TR_{2i}) / mr_2 = (TR_{21} + TR_{22}) / 2$$

TR_{21} 非农地面积比重(%)分级得分 Score for area proportion grade of non~farmland:

1 [0, 50%]; 2 [50%, 60%]; 3 [60%, 70%]; 4 [70%, 80%]; 5 [80%, 90%]; 6 [90%, 100%]

TR_{22} 梯田占农地面积比重(%)分级得分 Score for area proportion grade of terrace to farmland:

1 [0, 15%]; 2 [15%, 30%]; 3 [30%, 45%]; 4 [45%, 60%]; 5 [60%, 75%]; 6 [75%, 100%]

表 14 大南沟小流域坡度分级图、1998 年土地利用图和土壤肥力图的景观格局指数

Table 14 Landscape index of slope grade map, land use map in 1998 and soil fertility grade map

	斑块密度(n/hm^2) Patch density	均匀度(%) Evenness	优势度(%) Dominance
坡度分级图 Slope grade map	8.605	48.59	31.86
1998 年土地利用图 Land use map in 1998	0.003	70.52	20.30
1998 年土地利用图相对于坡度分级图的偏离(%) Deviation of Land use map in 1998 to slope grade map	99.97	45.15	36.28
土地肥力等级图 Soil fertility grade map	2.80	63.94	20.66
土壤肥力等级图象对于坡度分级图的偏离(%) Deviation of soil fertility grade map in 1998 to slope grade map	67.48	31.60	35.16

(3) 小流域整体压力综合得分 以表 13 为标准计算可知大南沟小流域 1998 年土地利用格局下的土地质量压力的综合评价赋分平均得分仅 2.01 分, 表示土地质量压力非常大, 土地质量低劣, 按照表 13 的评价分级标准, 大南沟小流域整体压力评定为 5 等。

3.2.2 小流域整体土地质量状态评价

(1) 小流域整体状态统计指标 土壤侵蚀、土壤肥力和植被盖度这 3 项小流域整体状态统计指标的质量得分均较低, 得分只有 2.67 分, 属 4 等。

(2) 小流域整体状态格局指标 同压力格局相类似, 土壤肥力等级图的景观指数和坡度的格局指数的偏离度也较大(表 14)。表明土地利用的因地适宜性比较差, 降低了整个小流域的土地质量等级。状态格局指标平均得分 3.33 分, 属 4 等。

(3) 流域出口水土流失指标 根据 LISEM 模型模拟的结果表明, 整个小流域出口的水土流失较为严重。其中, 洪峰流速高达 8053.911/s, 土壤侵蚀量高达 6.03t/ hm^2 , 状态质量得分均为 1 分; 径流总量也较高, 约 24.88 m^3/hm^2 , 状态质量得分 3 分。水土流失平均得分只有 1.67 分, 属 5 等。

(4) 小流域整体土地质量状态综合评价 通过上述分析, 以表 13 的评价赋分标准为依据, 可以得到大南沟小流域 1998 年土地利用格局下的土地质量状态的综合评价赋分。可见, 大南沟小流域整体的状态质量平均得分只有 2.72 分, 评定为 4 等。

3.2.3 小流域整体土地质量响应评价 根据表 13 的评价方法, 可以计算得到小流域土地单元响应指标平均得分为 3.90 分, 土地质量属 3 等。

小流域非农地(林地/灌木地、荒草地和果园/经济林地)面积较少, 只占 57.2%, 质量得分只有 2 分, 属 5 等。梯田占农地(休闲地和耕地)面积的比重很小, 只有 4.01%, 土地质量得分只有 1 分, 属 6 等。综合这两项指标, 得到小流域整体响应统计指标得分只有 1.50, 土地质量属 5 等。

综合上述指标得分发现, 整个小流域整体响应指标平均得分只有 2.70 分, 土地质量评定为 4 等。

3.2.4 大南沟小流域整体土地质量综合评价 整个小流域整体的压力、状态和响应指标得分均约 2.70 分左右, 均属 4 等。因

此,小流域整体土地质量综合得分也只有 2.71 分,土地质量评定为 4 等。

4 讨论

本研究分别以小流域单元(栅格)和小流域整体为评价对象,初步建立了基于 PSR 框架的,针对土壤侵蚀的小流域土地质量评价指标体系,并进行了土地质量评价。土地质量评价指标体系及其评价结果最终要应用于土地管理的实践,而土地质量的管理要求首先要了解不同流域土地质量状况,即哪些小流域土地质量好,哪些小流域土地质量差;建立以小流域整体为单元的土地质量评价指标体系可以进行不同小流域土地质量的比较,由于本研究只涉及了一个小流域,指标体系用于比较不同流域土地质量的意义还没有显示出来,随着研究的深入和涉及流域的增多,可以在小流域整体指标体系框架下,比较不同流域的压力、状态和响应状况,根据压力、状态和响应的表现结果,有助于决策者针对不同情况,采取相应措施。小流域土地质量的维持和改善可以通过流域内部土地利用的调整与规划来实现,而实现这一目标必须了解土地质量在空间上的分布,基于小流域单元(栅格)的土地质量评价指标体系正是为实现这一目的而设计的。通过评价,了解每一地块单元的土地质量状况,为进一步进行引起土地质量变化的因子分析奠定了基础。根据评价结果,通过调整流域土地利用结构,达到维持和提高流域土地质量的目的。

评价结果表明,小流域内部大部分土地的质量是 4 等,1 等地和 2 等地面积较小;小流域整体的土地质量也是 4 等。可见,在 1998 年土地利用基础上,小流域压力、状态和响应评价等级都较低,小流域综合土地质量较低。小流域的压力主要来自小流域地形条件的恶劣,通过研究可知小流域平均坡度 27.85 度,最大高达 59.39 度,98 年土地利用中,耕地平均坡度高达 24.56 度,如此陡峭的地形是导致小流域水土流失严重,土地质量下降的重要因素。同时,农民对土地的过分依赖也给土地带来巨大压力,在小流域两个自然村的调查表明农民人均年收入中的 63% 来农作物耕种的收入。因此,要维持或者提高流域的土地质量首先要减缓流域所受到的压力。可以考虑通过修建梯田等工程措施降低坡度,同时改变结构单一的种植制度,减缓小流域受到的压力;不过,如果工程措施不当可能会引发更大的水土流失,从根本上讲,可以考虑通过封山移民等措施,实现区域的自然恢复。

研究表明,不同土地利用方式下的土地质量存在着较大的差别^[13,14],林地/灌木林的土地质量较高,无论是土壤肥力、植被盖度、土壤侵蚀强度等指标得分都较高。荒草地、果园/经济林和休闲地的土地质量次之,耕地的土地质量最差。因此,实现土地的合理利用是维持或提高流域土地质量的重要措施。比如要严格限制陡坡开荒等不合理的土地利用,通过植树种草提高土壤抵抗侵蚀的能力,增强流域养分,特别是有机质含量,从而提高流域土地质量。另外,研究表明,土地利用的空间配置对流域土地质量也有重要的影响。许多研究标明,土地利用的合理配置可以减少流域的非点源污染,增强土壤肥力,减少水土流失^[15]。1998 年小流域的土地利用格局的斑块密度、均匀度和优势度和以坡度分级的格局指数相比差距很大,说明小流域相对平整的土地利用格局和流域破碎的地形存在严重的矛盾,这也是水土流失在空间累积的重要原因。因此,从理论上讲,应按照流域地形(坡度)的分布,采用不同的土地利用并加以合理配置,可以减少水土流失,提高流域土地质量。

研究表明,基于 PSR 框架的土地质量指标能够比较清楚地反映出引起土地质量变化的原因及由此产生的土地状态和响应信息,从而有助于决策者采取有针对性的措施,进行退化土地的恢复重建。鉴于我国土地退化的严峻形势,有必要在小流域尺度深入研究的基础上,建立区域尺度的土地质量指标体系^[16],建立区域土地质量监测和预警系统,实现区域土地的可持续利用。

References:

- [1] Guo X D, Qiu Y, Lian G, *et al.* The Progress and Prospect of Land Quality Indicators Based on "Press-State-Response" Framework. *Progress in Geography*, 2003, **22** (5): 479~489.
- [2] Hammond A, Adriaanse A, Rodenburg, *et al.* Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development. Washington, D. C. : World Resources Institute, 1995.
- [3] SCOPE. Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on the environment in the context of sustainable development. Bureau de Plan, Brussels, 1995.
- [4] Dumanski J, Gameda S, Pieri C. Indicators of land quality and sustainable land management: An annotated bibliography. Environmentally and Socially Sustainable development series; Rural development. Washington, D. C. , U. S. A; The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 1998.
- [5] Karlen D L, Rosek M J, Gardner J C, *et al.* conservation Reserve Program effects on soil quality indicators. *J. Soil and Water Cons.*, 1999, **54**(1): 439~444.
- [6] Islam K R, Weil R R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *J. of Soil and Water Cons.*, 2000, **55**(1): 69~78.
- [7] Hartemink A E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. *Geoderma* 1998. **85**: 283~306.
- [8] Bouma J, Droogers P, A procedure to derive land quality indicators for sustainable agricultural production. *Geoderma*, 1998. **85**: 103~

110.

- [9] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatio-temporal Distribution of Land Use in Relation to Topography in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(1): 20~29.
- [10] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatial variability of the soil physics properties and their relations to the influencing factors on the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(5): 587~594.
- [11] Fu B J, Qiu Y, Wang J, *et al.* Effect Simulations of Land Use Change on the Runoff and Erosion for a Gully catchment of the Loess Plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, **57**(6): 717~722.
- [12] De Roo A P J, Wesseling C G., Jetten V G, *et al.* LISEM: a single-event physically based hydrological Processes and soil erosion model for drainages basins I. theory, input and ourput. *Hydrological Processes*, 1996, **10**: 1107~1117.
- [13] Fu B J, Guo X D, Chen L D, *et al.* Land use changes and soil nutrient changes: A case study in Zunhua County, Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(6): 926~931.
- [14] Guo X D, Fu B J, Chen L D, *et al.* Effects of land use on soul quality in a hilly area-a case study in Zunhua County, Hebei Province. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(4): 447~455.
- [15] Chen L D, Fu B J, Xu J Y, *et al.* Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landsape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(11): 2406~2413.
- [16] Wang J, Guo X D, He T. Tentative study on indication system of monitoring and assessment of regional resourcs and eco-environment. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, **12**(6): 574~578.

参考文献:

- [1] 郭旭东,邱扬,连纲,等. 基于 PSR 框架的土地质量指标体系研究进展与展望. *地理科学进展*, 2003, **22**(5): 479~489.
- [9] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用的时空分布及其与地形因子的关系. *自然资源学报*, 2003, **18**(1): 20~29.
- [10] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. *地理学报*, 2002, **57**(5): 587~594.
- [11] 傅伯杰,邱扬,王军,等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, **57**(6): 717~722.
- [13] 傅伯杰,郭旭东,陈利顶,等. 土地利用变化与土壤养分的变化——以河北省遵化县为例. *生态学报*, 2001, **21**(6): 926~931
- [14] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响——以河北省遵化市为例. *地理学报*, 2001, **56**(4): 447~455.
- [15] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, **23**(11): 2406~2413.
- [16] 王静,郭旭东,何挺. 区域资源与生态环境综合监测及评价指标体系初探. *长江流域资源与生态环境*, 2003, **12**(6): 574~578.