

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 22 期
Vol.30 No.22
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 22 期 2010 年 11 月 (半月刊)

目 次

高温对水稻叶片蛋白质表达的影响·····	曹云英,段 骅,王志琴,等 (6009)
茶园间作柑桔杨梅或吊瓜对叶蝉及蜘蛛类群数量和空间格局的影响·····	叶火香,崔 林,何迅民,等 (6019)
鼠尾藻生长与生殖的权衡·····	张树宝,唐永政,王志芳,等 (6027)
不同氮素水平下超高产夏玉米冠层的高光谱特征·····	陈国庆,齐文增,李 振,等 (6035)
近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价 ·····	郑粉莉,张 锋,王 彬 (6044)
毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤养分的空间异质性·····	邱开阳,谢应忠,许冬梅,等 (6052)
CO ₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响 ·····	李清明,刘彬彬,艾希珍 (6063)
小兴安岭阔叶红松林粗木质残体空间分布的点格局分析·····	刘妍妍,金光泽 (6072)
光照对鄂东南 2 种落叶阔叶树种幼苗生长、光合特性和生物量分配的影响 ·····	杨 莹,王传华,刘艳红 (6082)
不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响·····	林超文,罗春燕,庞良玉,等 (6091)
黄土残塬沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应·····	王盛萍,张志强,张建军,等 (6102)
农村土地经营权流转对区域景观的影响——以北京市昌平区为例·····	刘 同,李 红,孙丹峰,等 (6113)
基于农户响应的北方农牧交错带生态改善策略·····	徐建英,柳文华,常 静,等 (6126)
滨岸不同植物配置模式的根系空间分布特征·····	仲启铖,杜 钦,张 超,等 (6135)
三江平原小叶章湿地剖面土壤微生物活性特征·····	杨桂生,宋长春,宋艳宇,等 (6146)
不同水分处理对湿地松幼苗生长与根部次生代谢物含量的影响·····	李昌晓,魏 虹,吕 茜,等 (6154)
生活污水慢渗生态处理对土壤及杨树生长的影响·····	白保勋,杨海青,樊 巍,等 (6163)
玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响·····	时 鹏,高 强,王淑平,等 (6173)
茶园 4 种半翅目主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	周夏芝,毕守东,柯胜兵,等 (6183)
采煤塌陷地不同施肥处理对土壤微生物群落结构的影响·····	李金岚,洪坚平,谢英荷,等 (6193)
典型区域果园表层土壤 5 种重金属累积特征·····	杨世琦,刘国强,张爱平,等 (6201)
工业园区氮代谢——以江苏宜兴经济开发区为例·····	武娟妮,石 磊 (6208)
公路绿化带对路旁土壤重金属污染格局的影响及防护效应——以山西省主要公路为例·····	王 慧,郭晋平,张芸香,等 (6218)
奥运期间北京 PM _{2.5} 、NO _x 、CO 的动态特征及影响因素 ·····	曾 静,廖晓兰,任玉芬,等 (6227)
新疆绿洲农田土壤-棉花系统 9 种矿质元素生物循环特征 ·····	韩春丽,刘 娟,张旺锋,等 (6234)
甘肃省黄土高原旱作玉米水分适宜性评估·····	姚小英,蒲金涌,姚茹莘,等 (6242)
基于粪便 DNA 的马鹿种群数量和性比 ·····	田新民,张明海 (6249)
专论与综述	
水生态功能分区研究中的基本问题·····	唐 涛,蔡庆华 (6255)
土壤水分遥感监测研究进展·····	杨 涛,官辉力,李小娟,等 (6264)
中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施·····	邓振镛,王 强,张 强,等 (6278)
问题讨论	
城市物质流分析框架及其指标体系构建·····	陈 波,杨建新,石 焱,等 (6289)
研究简报	
湖南会同不同退耕还林模式初期碳密度、碳贮量及其空间分布特征 ·····	田大伦,尹刚强,方 晰,等 (6297)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 32 * 2010-11

近 100 年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价

郑粉莉^{1,2,*}, 张 锋^{1,3}, 王 彬^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

3. 松辽水利委员会松辽流域水土保持监测中心站, 吉林 长春 130021)

摘要:以黄土高原子午岭地区近 100 a 不同开垦年限位于梁坡的农地为研究对象,通过相关分析并结合所选指标的有效性、全面性和敏感性分析,从 6 个土壤物理指标、6 个土壤化学指标、8 个土壤生物指标,共 20 个土壤性质指标中,筛选出有机碳、真菌数量、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、毛管孔隙度、物理性粘粒、粗粉粒和水稳性团聚体平均重量直径(MWD)等 8 个土壤性质指标,作为土壤质量退化评价指标体系。通过主成分分析,计算土壤质量综合指数(SQI),定量评价近 100 a 植被破坏侵蚀环境下的土壤质量退化过程。结果表明,林地 SQI 在 0—20 和 20—40 cm 土层分别为 0.909 和 0.427;林地开垦耕种 100a 期间,SQI 随开垦年限的增加呈快速下降的趋势,尤其是在开垦耕种初期 4 a 内,SQI 年均下降速率在 0—20 和 20—40 cm 土层分别达 0.073 和 0.028;同林地相比,SQI 分别下降了 32.3% 和 26.2%。此后随着开垦耕种年限的增加下降速率逐渐减小。开垦耕种 12 a 后,0—20 和 20—40 cm 土层的 SQI 分别为 0.549 和 0.235,分别下降 39.6% 和 45.0%;4—12 a 期间的 SQI 下降速率分别为开垦初期的 10.9% 和 35.7%。开垦耕种 43 a 后,SQI 在 0—20 和 20—40 cm 土层分别为 0.333 和 0.144,分别较林地下降 64.4% 和 66.3%,12—43 a 期间的 SQI 下降速率分别为开垦初期的 9.6% 和 10.7%;开垦耕种 100 a 期间,SQI 在 0—20 和 20—40 cm 土层分别为 0.140 和 0.068,分别下降 84.6% 和 84.1%;43—100 a 期间的 SQI 下降速率分别为开垦初期的 4.1% 和 3.6%。同时,SQI 年均下降幅度在 0—20 cm 土层高于在 20—40 cm 土层;且随开垦耕种年限的增加,SQI 在 0—20cm 和 20—40 cm 上下两土层之间的差异趋于减少,说明加速侵蚀是研究区土壤质量下降的主要原因。

关键词:植被破坏;侵蚀环境;土壤质量;评价指标;定量评价

Quantifying soil quality degradation over 100 years after deforestation under erosional environments

ZHENG Fenli^{1,2,*}, ZHANG Feng^{1,3}, WANG Bin^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Soil and Water Conservation Monitoring Center, Song-Liao Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Changchun 130021, China

Abstract: Soil erosion and soil quality degradation following deforestation are major processes responsible for eco-environmental deterioration on the loess Plateau. However, there is little information available on soil quality degradation caused by deforestation and increased soil erosion. To quantify the degradation rates, we selected eight croplands on southern slopes with different years of cultivation within 100 years in the Ziowuling area as a case study. Using correlation analysis in conjunction with effectiveness, completeness, and sensitivity of all 20 indicators, we selected eight indicators, i. e., soil organic carbon, fungi amount, alkaline phosphatase activity, invertase activity, capillary porosity, coarse clay, coarse silt, and mean weight diameter of water-stable aggregate(MWD) for use in the evaluation system. A quantitative Soil

基金项目:中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-05-03);西北农林科技大学创新团队项目

收稿日期:2010-02-10; **修订日期:**2010-07-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn.

Quality Index (*SQI*) comprised of these 8 indicators was developed using a principal component analysis. Results showed that *SQI* in the 0—20 and 20—40 cm soil depths of the forestlands were 0.909 and 0.427. The *SQI* decreased in the top 40 cm layer as cultivation years increased, especially during the first four years of cultivation with annual reduction rates of 0.073 and 0.028 in the first (0—20 cm) and second (20—40 cm) depths respectively. Compared with the corresponding forestlands, *SQI* during the initial four years of cultivation decreased by 26.2% and 32.3% in the 1st and 2nd depths, respectively. After 12 years of cultivation, *SQI* in the 1st and 2nd depths were 0.594 and 0.235, decreased by 39.6% and 45.0%, respectively. Reduction rates in the 1st and 2nd depths during 4—12 years of cultivation were 10.9% and 35.7% relative to the initial four years of cultivation. After 43 years of cultivation, *SQI* in the 1st and 2nd depths were 0.333 and 0.144 and reduced by 64.4% and 66.3%, respectively, compared with the forestlands. Reduction rates in the 1st and 2nd depths during 12—43 years of cultivation were 9.6% and 10.7% relative to the initial four years of cultivation. During 100 years of cultivation, *SQI* in the two depths were 0.140 and 0.068 and reduced by 84.6% and 84.10%, respectively. Reduction rates in the two depths during 100 years of cultivation were 4.1% and 3.6% relative to the initial four years of cultivation. Meanwhile, the reduction rates of *SQI* in the 1st depth were greater than those in the 2nd depth, and the differences of *SQI* between the two layers decreased as the cultivation years increased, which implied that accelerated erosion could be a main cause for soil quality degradation in the region.

Key Words: vegetation destruction; accelerated soil erosion; soil quality; quantitative evaluation

植被破坏加速侵蚀是导致黄土高原土壤质量退化和生态环境恶化的主要驱动力^[1-2]。近年来,关于黄土高原植被破坏加速侵蚀对土壤质量演变的研究主要集中于单个或几个土壤质量因子变化的研究。已有的研究表明,林地被开垦耕种 5a 后,耕层土壤中腐殖酸总碳、胡敏酸碳、富啡酸碳分别减少 14.4%—89.5%、12.1%—89.1% 和 16.2%—90.0%^[3];林地被开垦 10 a 后,耕地表层的稳渗速率较开垦前降低 78.2%—81.8%^[4];林地被开垦 15 a 后,裸露地浅沟集水区不同地形部位表层土壤全氮、有机碳、速效磷和土壤微生物总数分别减少 37.9%—82.6%、42.7%—86.4%、24.2%—80.3% 和 31.8%—92.0%^[5]。然而,土壤质量是一个综合的概念,包括生产力、环境质量、动物健康 3 个方面^[6]。就土壤质量生产力方面,就涉及到土壤物理、化学和生物学特性。由于单一土壤指标对反映土壤质量的有效性、敏感性不同,决定了单一的土壤指标难以精确的评价与比较土壤质量的变化^[7]。因此,如何把多个土壤指标转化为一个综合信息,定量化描述土壤质量已成为研究者研究的热点^[8-10]。目前关于土壤质量定量评价方法通常有 4 大类,即多变量指标克立格法、土壤质量动力学方法、土壤质量综合评分法、土壤相对质量评价法^[11-12],国内外尚无统一的标准。本文运用空间序列代替时间序列的研究方法,以子午岭地区近 100a 不同开垦耕种年限的 8 块向阳梁坡农地为研究对象,通过从 20 个测定的土壤物理、化学和生物学指标中筛选出反映土壤退化敏感性指标,建立植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化评价指标体系,再通过主成分分析把多个土壤质量退化评价指标转化为土壤质量综合指数(*SQI*),定量评价植被破坏加速侵蚀对土壤质量的影响,以期为黄土高原土壤肥力提高和良性生态环境重建提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西延安富县桥北林业局任家台林场所辖地,地貌类型属于黄土覆盖的梁状丘陵沟壑区,海拔 920—1683 m,相对高差 100—150 m。年平均气温 9℃,年均降水量 576.7 mm,主要集中在 7—9 月份,占全年降水量的 70% 以上。区内主要树种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Populus davidiana* Done)、白桦(*Betula platyphylla*)和人工油松(*Pinus tabulaeformis*),草本植被以大披针苔草(*Carex lenceolata*)和白草(*flaccid pennisetum*)为主,植被覆盖度达 90% 以上。林下枯枝落叶层厚 2—5 cm,腐殖质层明显。林区内的土壤类型为灰色黄土正常新成土,无明显的淋溶层和淀积层^[3];开垦时间较长农地的土壤类似黄绵土。由于坡耕地耕

作方式仍为传统的牛拉犁耕,耕层土壤厚度约为 20 cm。据历史考证,该区在植被恢复前,人为活动强烈,土壤侵蚀强度类似今日的安塞、延安一带^[13]。自 1866 年起,因战乱及回汉民族纠纷,人口大量外迁,耕地荒芜,植被得以自然恢复,形成目前的次生林景观。从 20 世纪 20 年代起,由于天灾、饥荒及兵乱,人口不断迁入、开荒,植被再度遭到破坏。其中,有 4 次毁林开荒比较集中的时期,即民国 18 年(1929 年)的饥荒时期、国家 3a 经济困难时期(1960—1962 年)、十年“文化大革命”时期(1966—1976 年)及实行家庭联产责任制时期(1978 年后)。人口的大量迁移具体表现为目前居住在该地区的居民,以山东、河南、安徽和四川籍居民较多,而本地居民次之。由于该区涌入大量的人口,自 1950 年以来,林区界限平均每年后退 0.5 km,40a 林区边界共缩小 20 km^[14]。因此,近子午岭地区为研究近 100 多年植被破坏加速侵蚀过程中土壤质量动态变化提供了理想的研究地点。

1.2 研究方法

1.2.1 样点选取

受研究区交通不便的影响,很少有坡耕地施农家肥;又由于研究区坡耕地多位于阳坡和半阳坡,所以确定以不同开垦年限,少施或不施农家肥的向阳坡农地为研究对象。确定开垦年限是进行本研究前提条件,具体做法如下:(1)首先确定历史上几次大规模破坏植被开垦的事件,为开垦年限确定提供背景时段。研究区有明显的四次毁林开荒比较集中的时期,即民国 18 年(1929 年)的饥荒时期、国家 3a 经济困难时期(1960—1962 年)、十年“文化大革命时期”(1966—1976 年)及实行家庭联产责任制时期(1978 年后)。另外,人口大量迁入研究区的具体表现是:目前在居住在该区的居民,以山东、河南、安徽和四川居多,而本地居民次之。(2)于 2004—2005 年,先后 6 次走访农户及与农户现场考证、填图等,基本确定了研究区内各农地的耕作历史。(3)通过与年高老农、村干部的历史回忆及查阅地契,查阅的地契包括清朝后期(2 块土地)、民国时期(2 块土地),解放初期(3 块土地)和改革开放时期(12 块土地),确定了研究区内各农地的开垦年限,并初步确定了研究样区。(4)对初步确定的研究样区各农地的轮作、施肥情况进行详细调查及现场考察,量测研究样区的经度、纬度、海拔、坡向、坡度及地埂高度。最后确定以海拔、坡向、坡度相近而开垦年限不同(4、9、12、33、43、52、75、100a)的 8 块梁坡农地为研究对象,并以同一坡位上的次生林地作为对照。所选研究样区的地理位置为 E109°08′57″—E109°10′54″,N36°03′36″—36°05′27″,样区东西相距 3.59 km,南北相距 3.43 km,各样地基本不受环境空间差异的影响。各采样农地面积为 667—6270 m²,对照次生林地所选面积为 1166 m²(表 1)。对照次生林地的恢复年限约为 140a,主要乔木树种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)等,林下灌木优势种主要是虎榛子(*Ostryopsis macrocarpa*)和茶条槭(*Acer ginnala*)为主,草本植物优势种为苔草(*Carex siderosticta*)为优势草种;林木郁闭度达 0.7 以上。

1.2.2 土壤样品采集

对于每块样地,从左到右划为大概宽度相等的 3 个条带(即 3 个重复),在每个条带沿坡长方向用直径为 20 cm 土钻从坡上至坡下以“S”型线路分层采集 0—20cm 及 20—40 cm 土层的土壤样品 12—15 个,并将同一土层所采集的土壤样品混合,用四分法获取每块样地每个采样条带 0—20cm 及 20—40 cm 土层的土壤样品各约 500 g(即每块样地采集 0—20cm 及 20—40 cm 土层的混合土壤样品各 3 个),装入保鲜袋,短时间内带回实验室,进行微生物数量测定;剩余土样经风干、研磨后,过 2 mm、1 mm 和 0.25 mm 的土筛,分别装袋,供土壤养分及土壤酶活性分析用。此外在每块样地选 6—8 个典型剖面,分层采集 0—20 cm 及 20—40 cm 原状土,做土壤团聚体、土壤容重及土壤孔隙度分析。

1.2.3 土壤样品测定方法^[15-17]

土壤颗粒分析用激光粒度分析法(采用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光粒度仪分析);土壤水稳性团聚体用萨维诺夫法;土壤容重及土壤孔隙度用环刀法;有机碳用重铬酸钾容量法—外加热法;土壤全 N 用半微量开氏法;氨态氮用 2mol/L KCl 浸提-靛酚蓝比色法;硝态氮用酚二磺酸比色法;速效 P 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 比色法;pH 值用 pH 酸度计电位法(水:土为 1:1);微生物的分离计数采用稀释平板涂布法;蔗糖酶活

性用 3,5-二硝基水杨酸比色法;碱性磷酸酶活性用苯磷酸二钠比色法;脲酶活性用靛酚蓝比色法;过氧化氢酶活性用 KMnO_4 滴定法。

表 1 研究样地基本情况

Table 1 General situation of research sites

编号 No.	开垦时间 Time /a	地理位置 Geographic location	面积 Area /m ²	坡向 slope aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation /m	2005 年施肥/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Fertilizer application			轮作种植 Rotation		
							Total N	P ₂ O ₅	K ₂ O	2003	2004	2005
1	CK	N36°05.27' E109°08.58'	1166	S	14-32	1244	0	0	0	-	-	-
2	4	N36°04.42' E109°10.46'	667	ES 52	6-14	1231	0	0	0	谷子	黄豆	红豆
3	9	N36°04.44' E109°10.51'	1244	WS11	8-25	1256	0	0	0	黄豆	菜子	谷子
4	12	N36°04.31' E109°10.54'	1429	S	13-17	1257	15.8	18.1	16.9	谷子	红豆	菜子
5	33	N36°03.54' E109°09.51'	2767	WS	8-21	1312	16.0	11.2	0	玉米	香料	黄豆
6	43	N36°03.36' E109°10.42'	4934	S	8-18	1288	11.2	12.8	12.0	黄豆	小麦	黄豆
7	52	N36°03.45' E109°10.30'	6270	S	3-13	1245	22.3	25.5	23.9	小麦	黄豆	红豆
8	75	N36°04.31' E109°10.54'	3667	S	3-7	1252	18.4	21.0	19.7	玉米	玉米	黄豆
9	100	N36°05.00' E109°10.33'	2133	ES10	5-7	1296	42.7	30.0	0	小麦	红豆	菜子

2 土壤质量退化的评价指标体系选取与土壤质量综合指数计算

2.1 土壤质量退化的评价指标体系选取

由于土壤质量指标的多样化,土壤质量指标的确定比较复杂,而且在不同的土壤系统之间变化很大^[18],因此到目前为止始终没有形成统一的评价体系。因此,在选取指标的过程中,需要明确土壤质量评价目标,即针对土壤哪方面功能、何种问题而进行^[19]。因此,本研究从土壤物理、化学、生物学性质出发,评价样区土壤肥力质量的总体水平。本着针对性、有效性以及敏感性和稳定性兼顾的原则^[20-21],参照前人的研究成果,选取 20 个涵盖土壤物理学、化学和生物学性质指标,进行了测定分析和计算,从而保证了土壤质量退化评价的全面性。其中土壤物理指标 6 个,包括水稳性团聚体(>0.25 mm)、水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、颗粒组成(1—0.25 mm、<0.25—0.05 mm、<0.05—0.01 mm、<0.01—0.005 mm、<0.005—0.001 mm、<0.001 mm、<0.01 mm)、总空隙度和毛管孔隙度、容重;土壤化学指标 6 个,包括有机质、全氮、氨态氮、硝态氮、速效磷、pH 值;土壤生物学指标 8 个,包括碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、细菌数量、真菌数量、放线菌数量及微生物总数。从 20 个土壤性质指标筛选土壤质量评价指标的具体方法见参考文献^[22]。主要分析过程与步骤如下:(1)将土壤性质指标的变异系数和相对极差作为划分指标敏感性的依据,变异系数和相对极差越大,说明该指标对土壤差异越敏感^[20]。敏感性分析结果表明,9 个土壤性质指标(氨态氮、硝态氮、速效磷、pH、细菌数量、放线菌数量及微生物总数、脲酶活性、过氧化氢酶活)过于敏感或欠敏感而被剔除。(2)采用主成分分析法进一步筛选适宜的评价指标。具体是对初步筛选的 11 项指标(>0.25 mm 水稳性团聚体、水稳性团聚体平均重量直径(MWD)、颗粒组成、总空隙度和毛管孔隙度、容重、有机质、全氮、速效磷、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、真菌数量)进行相关分析,得出 60 对相关关系中的显著水平,并基于主成分分析结果筛选土壤质量评价指标。最终筛选出与土壤质量紧密相关的表征土壤物理学、化学和生物学性质的 8 个敏感性指标,即有机碳、真菌数量、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、毛管孔隙度、物理性粘粒(<0.01 mm)、粗粉粒(0.05—0.01 mm)和水稳性团聚体平均重量直径(MWD),构成土壤质量退化评价指标

体系。

2.2 土壤质量综合指数(integrated soil quality index—SQI)的计算

2.2.1 土壤质量退化评价指标权重的确定

利用 DPS 数据处理系统对已筛选出的土壤质量退化评价指标进行主成分分析(表 2),从中提取主成分,获得各主成分的方差贡献率、累积方差贡献率及各土壤质量退化评价指标在不同主成分中的因子负荷量。一般认为在对 n 个指标进行主成分分析时,当前 $j(j < n)$ 个主成分的累积方差贡献率达到 85% 以上时,可认为前 j 个主成分基本反映了原 n 个指标所含的大部分信息,从而可用 j 个彼此不相关的综合因子表达原有 n 个指标的总信息,后 $n - j$ 个主成分可以略去^[18]。从表 2 可以看出,当主成分个数 $j = 3$ 时,累积方差贡献率达到 94.5%,已经满足分析要求。

在本研究中主成分个数 $j = 3$ 确定后,利用各土壤质量退化评价指标在不同主成分中的因子负荷量,计算它在不同主成分中的权重(表 2),计算公式如下:

$$W_i = \text{ComponentCapacity}_i / \sum_{i=1}^n (\text{ComponentCapacity}_i)$$

式中, W_i 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量退化评价指标的权重; $\text{ComponentCapacity}_i$ 表示在某一主成分中第 i 个土壤质量退化评价指标因子负荷量的绝对值。

表 2 主成分贡献率与土壤质量指标的权重
Table 2 Values of component capacity and weights of the soil quality indexes

土壤质量指标 Soil quality indexes	第一主成分 First principal component		第二主成分 Second principal component		第三主成分 Third principal component	
	负荷量 Capacity	权重 Weight	负荷量 Capacity	权重 Weight	负荷量 Capacity	权重 Weight
有机碳 Organic C	0.397	0.145	-0.146	0.068	-0.092	0.039
真菌数量 Fungi amount	0.370	0.135	0.239	0.111	-0.346	0.146
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase activity	0.389	0.142	0.083	0.039	0.474	0.200
蔗糖酶 Invertase activity	0.385	0.141	0.246	0.115	0.335	0.142
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.358	0.131	0.175	0.081	-0.642	0.271
物理性粘粒 Physical clay particle	0.110	0.040	-0.796	0.371	0.014	0.006
粗粉粒 Coarse silt	-0.330	0.121	0.435	0.202	0.143	0.060
MWD	0.396	0.145	0.027	0.012	0.321	0.136
方差贡献率 Variance contribution/%	72.151		17.615		4.735	
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution/%	72.1518		89.766		94.500	

MWD 为水稳性团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of water-stable aggregate

2.2.2 土壤质量指标隶属度的计算

为了避免计算结果受变量量纲的影响,保证其客观性和科学性,在进行土壤综合指数(SQI)计算之前必须对原始数据矩阵进行标准化处理,即对各土壤质量退化评价指标的隶属度进行计算。各指标隶属度的取值范围在 0—1 之间(表 3),在同等条件下指标隶属度值越大,反映该土壤此种质量指标越理想。由于各土壤质量评价指标的变化具有连续性,故各评价指标采用连续的隶属度函数。在本研究中,粗粉粒隶属度的计算采用降型分布函数,其它 7 项土壤质量退化评价指标隶属度的计算采用升型分布函数,计算公式如下:

$$Q(x_i) = (x_{ij} - x_{imin}) / (x_{imax} - x_{imin}) \text{ 升型}$$

$$Q(x_i) = (x_{imax} - x_{ij}) / (x_{imax} - x_{imin}) \text{ 降型}$$

式中, $Q(x_i)$ 表示第 i 项土壤质量退化评价指标的隶属度值; x_{ij} 表示各土壤质量退化评价指标分析测定值; x_{imax} 和 x_{imin} 分别表示第 i 项土壤质量退化评价指标分析测定值中的最大值和最小值。

2.2.3 土壤质量综合指数(SQI)的计算

根据加乘法则,对各个土壤质量退化评价指标值采用乘法进行合成,计算不同开垦耕种年限土壤质量的

综合指数(SQI),计算公式如下:

$$SQI = \sum_j^m k_j (\sum_{i=1}^n W_i \times Q(x_i))$$

式中, n 为敏感性评价指标的个数, m 为所选主成分个数, k_j 为第 j 个主成分的方差贡献率。

表 3 不同开垦年限土壤质量退化评价指标的隶属度值
Table 3 Membership function values of soil quality indexes in different deforested years

土壤质量指标 Soil quality indexes	土层 Layers of soil profile/cm	开垦时间 Deforested time/a								
		0	4	9	12	33	43	52	75	100
有机碳 Organic C	0—20	1.000	0.706	0.528	0.499	0.202	0.144	0.186	0.080	0.068
	20—40	0.449	0.235	0.279	0.099	0.068	0.050	0.054	0.000	0.022
真菌 Fungi amount	0—20	1.000	0.580	0.903	0.370	0.442	0.076	0.266	0.283	0.251
	20—40	0.135	0.023	0.055	0.124	0.004	0.012	0.000	0.027	0.015
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase activity	0—20	0.889	0.747	1.000	0.662	0.498	0.449	0.462	0.293	0.222
	20—40	0.485	0.399	0.735	0.202	0.120	0.053	0.154	0.019	0.000
蔗糖酶 Invertase activity	0—20	1.000	0.611	0.969	0.614	0.501	0.558	0.531	0.261	0.296
	20—40	0.322	0.145	0.608	0.113	0.061	0.006	0.120	0.000	0.013
毛管孔隙度 Capillary porosity	0—20	1.000	0.599	0.483	0.489	0.577	0.291	0.507	0.517	0.224
	20—40	0.232	0.356	0.090	0.124	0.142	0.029	0.090	0.021	0.000
物理性粘粒 Physical clay particle	0—20	0.757	0.730	0.396	0.540	0.459	0.320	0.262	0.337	0.000
	20—40	1.000	0.872	0.652	0.650	0.529	0.693	0.519	0.540	0.432
粗粉粒 Coarse silt	0—20	1.000	0.457	0.480	0.551	0.264	0.438	0.277	0.213	0.000
	20—40	0.660	0.519	0.333	0.398	0.090	0.396	0.116	0.314	0.153
MWD	0—20	1.000	0.819	0.913	0.941	0.426	0.541	0.480	0.232	0.078
	20—40	0.467	0.242	0.515	0.374	0.134	0.097	0.000	0.009	0.016

MWD 为水稳性团聚体平均重量直径 Mean weight diameter of water-stable aggregate

3 结果与分析

林地被开垦破坏后,大量表层肥沃土壤被冲刷流失,原来以生物积累为特征的成土过程逆转为加速侵蚀主导下的土壤退化过程。 SQI 随开垦年限的增加急剧下降反应了林地开垦后土壤质量演变的特征(表 4 和图 1)。对照林地的 SQI 在 0—20cm 及 20—40 cm 土层分别为 0.904 和 0.427;林地被开垦破坏后,由于强烈的土壤侵蚀,导致林地 SQI 随开垦年限的增加呈快速下降的趋势。开垦 4、9、12、33、43、52、75 和 100 a 的农地同林地相比,在 0—20 cm 土层, SQI 分别下降了 32.3%、25.4%、39.60%、56.3%、63.3%、61.1%、71.3% 和 84.6%;在 20—40 cm 土层, SQI 分别下降了 26.3%、11.6%、45.1%、70.9%、66.3%、73.2%、76.7% 和 84.1%。开垦耕种 100 a 农地的 SQI 在 0—20 及 20—40 cm 土层仅分别为 0.140 和 0.068,表明林地开垦 100 a 间土壤质量退化非常明显,证明植被破坏的加速侵蚀是导致土壤退化的主要驱动因子。

表 4 土壤质量综合指数(SQI) 随开垦年限的变化
Table 4 Integrated soil quality index(SQI) change with cultivated years

主成分 Component number	土层/cm Layers of soil profile	开垦时间 Cultivated time/a								
		林地	4	9	12	33	43	52	75	100
第一 First	0—20	0.974	0.655	0.747	0.592	0.418	0.356	0.383	0.269	0.158
	20—40	0.415	0.294	0.391	0.220	0.106	0.111	0.093	0.070	0.045
第二 Second	0—20	0.906	0.634	0.581	0.535	0.416	0.337	0.322	0.291	0.094
	20—40	0.630	0.511	0.446	0.378	0.244	0.348	0.247	0.269	0.196
第三 Third	0—20	0.976	0.654	0.776	0.590	0.476	0.366	0.435	0.327	0.197
	20—40	0.352	0.279	0.370	0.191	0.101	0.064	0.084	0.037	0.019
SQI	0—20	0.909	0.615	0.678	0.549	0.397	0.333	0.354	0.261	0.140
	20—40	0.427	0.315	0.378	0.235	0.124	0.144	0.115	0.100	0.068
SQI 下降速率 Reduction rate of SQI	0—20	0.073	−0.010	0.032	0.007	0.006	−0.002	0.004	0.005	
	20—40	0.028	−0.011	0.036	0.005	−0.002	0.003	0.001	0.001	

SQI 在不同开垦期间表现出不同的下降速率。具体表现为:在 0—20cm 和 20—40 cm 土层,开垦初期(0—4 a)的 *SQI* 年均下降速率分别为 0.073 和 0.028,即林地开垦耕种 4a 后,*SQI* 在 0—20 和 20—40 cm 土层分别下降了 32.3% 和 26.2%;在 4—12 a 期间,*SQI* 年均分别下降 0.008 和 0.010,其下降速率分别为开垦初期(0—4 a)的 10.9% 和 35.7%;在 12—43 a 期间,*SQI* 年均分别下降 0.007 和 0.003,其下降速率分别为开垦初期(0—4 a)的 9.6% 和 10.7%;在 43—100 a 期间,*SQI* 年均分别下降 0.003 和 0.001,其下降速率仅分别为开垦初期(0—4 a)的 4.1% 和 3.6%,0—20 和 20—

40 cm 土层的 *SQI* 在这 58a 期间下降的程度仅相当于在开垦初期(0—4 a)2.6 a 和 2.7 a 的下降程度。说明林地被开垦耕种初,*SQI* 下降速率最大,此后随着开垦耕种年限的增加其下降速率逐渐减弱。

SQI 在 0—20 cm 土层的年均下降速率高于 20—40 cm 土层,具体表现为,在 0—4 a、4—12 a、12—43 a 和 43—100 a 阶段,*SQI* 年均下降值在 0—20 cm 土层分别是在 20—40 cm 土层的 2.61 倍、0.82 倍、2.38 倍、2.54 倍,反映出植被破坏加速侵蚀对土壤质量退化的影响在 0—20 cm 土层大于在 20—40 cm 土层。

林地和各不同开垦年限农地的 *SQI* 在 0—20 cm 土层皆高于 20—40 cm 土层。在林地,由于植被对土壤养分的表聚效应,0—20 cm 与 20—40 cm 上下土层之间的 *SQI* 差值为 0.481,差异比较明显。当林地开垦为农地后,随着开垦年限的延长,0—20cm 与 20—40 cm 上下土层之间的 *SQI* 差异逐渐缩小,开垦 4、9、12、33、52、75 和 100 a 的农地,上下两土层 *SQI* 的差值分别为 0.300、0.300、0.314、0.273、0.189、0.239、0.161 和 0.072,表明随着开垦年限的增长,上下两土层之间的土壤质量差异逐渐减小。

4 结论

本文以近 100a 不同开垦年限的向阳梁坡农地为研究对象,定量评价子午岭地区植被破坏加速侵蚀环境下土壤质量退化的过程,所得结论如下:

(1)通过敏感分析、主成分分析和相关分析等,从 6 个土壤物理指标、6 个土壤化学指标、8 个土壤生物指标,共 20 个土壤性质指标中,筛选出有机碳、真菌数量、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、毛管孔隙度、物理性粘粒、粗粉粒和水稳性团聚体平均重量直径(MWD)等 8 个土壤性质指标,作为土壤质量退化评价指标体系。

(2)林地被破坏开垦后,土壤质量随开垦年限增加呈明显的下降趋势。开垦 4—100 a 的农地同林地相比,*SQI* 在 0—20cm 和 20—40 cm 土层,分别下降了 25.4%—84.6% 和 11.6%—84.1%。

(3)开垦耕种初期(0—4 a) *SQI* 下降速率最大,此后随着开垦耕种年限的增加其下降速率逐渐减小。具体表现为在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,*SQI* 年均下降速度在开垦耕种初期(0—4 a)分别为 0.073 和 0.028,即林地开垦耕种 4a 后土壤质量综合指数分别下降了 32.3% 和 26.2%;在 4—12 a 期间,*SQI* 分别以年均 0.008 和 0.010 下降,其下降速率分别为开垦耕种初期的 10.9% 和 35.7%;在 12—43 a 期间,*SQI* 分别以年均 0.007 和 0.003 下降,其下降速率分别为开垦耕种初期的 9.6% 和 10.7%;在 43—100 a 期间,*SQI* 分别以年均 0.003 和 0.001 下降,其下降速率分别为开垦耕种初期的 4.1% 和 3.6%。

(4) *SQI* 在 0—20 cm 土层的年均下降速率高于 20—40 cm 土层,随着开垦年限的增加,0—20cm 与 20—40 cm 上下两土层之间的 *SQI* 差值在 0.300—0.072 之间呈递减趋势,表明随着开垦年限的延长,上下两土层之间的土壤质量差异逐渐减小。

References:

- [1] Tang K L, Xiong G S, Liang J Y, Jing K, Zhang S L, Chen Y Z, Li S M. Runoff and Sediment Changes in the Yellow River Basin. Beijing: China Science and technology Press, 1993:91-149.

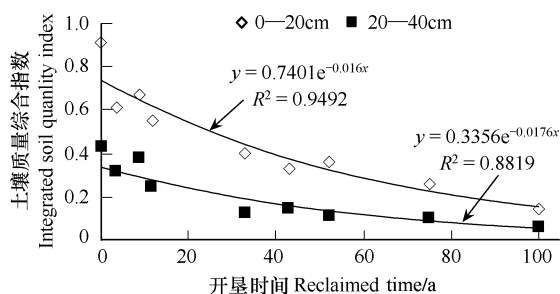


图 1 土壤质量综合指数(*SQI*)随开垦年限的变化

Fig. 1 Integrated soil quality index (*SQI*) change with cultivated years

- [2] Tang K L, Wang B K, Zheng F L, Zhang S L, Shi M L, Fang X M. Impact of human activities on soil erosion on the Loess Plateau. *Yellow River*, 1994, 2:13-16.
- [3] Zheng F L, Zhang C. Impact of accelerated erosion on dynamics of soil humic acids. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 194-199.
- [4] Zha X, Huang S Y. Effects of vegetation destruction on accelerated erosion and soil degradation processes on the Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(2): 109-114.
- [5] Zhang F, Zheng F L, An S S, Li Y Z. The impacts of accelerated erosion on soil nutrient loss and microbial quantity following deforestation in the Ziuling area. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 826-833.
- [6] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality//Doran J W ed. *Defining Soil Quality for A Sustainable Environment*: SSS Spec. Publ. 35. SSSA and ASA, Madison, US, 1994: 3-21.
- [7] Wang X J, Gong Z T. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 1998, 81: 339-355.
- [8] Adejuwon J O, Ekanade O. A comparison of soil properties under different land use types in a part of the Nigerian cocoa belt. *Catena*, 1988, 15: 319-331.
- [9] Liu S L, Fu B J, Chen L D, Qiu J, Lü Y H. Comparison of two quantitative methods in assessing soil quality in different land uses. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12 (5): 422-426.
- [10] Zhang Q F, Song Y C, You W H. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in TianTong, ZheJiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (2): 174-178.
- [11] Zhao Q C, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment I. Definition of soil quality and its evaluation methods. *Soils*, 1997, 29 (3): 113-120.
- [12] Zheng Z P, Liu Z X. Soil quality and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (1): 131-134.
- [13] Tang K L, Wang B K, Zheng F L, Zha X, Wang W L, Cai Q, Bai H Y. Analyzing on natural erosion and man-made accelerated erosion in the Ziuling forest Area. *Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Resources*, 1994, 2: 13-16.
- [14] Mi D S, Jiang D S, Liu M X, Lu Z F. Forest destruction and its impact in recent years. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1982, 2 (5): 48-49.
- [15] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. *Mensuration of Soil Physical Property*. Beijing: Science Press, 1978: 78-83.
- [16] Bao S D. *Soil Chemical Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 25-97.
- [17] Xu G H, Zheng H Y. *Manual of Soil Microbiology Analysis*. Beijing: Agriculture Press, 1986: 249-291.
- [18] Liu Z F, Fu B J, Liu G H, Zhu Y G. Soil quality: concept, indicators and its assessment. *Acta Ecologica Sinica* 2006, 26(3): 901-913.
- [19] Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation. *Progress in Geography*, 1999, 18 (2): 2118-128.
- [20] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (10): 1843-1848.
- [21] Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (3): 285-293.
- [22] Bai W J, Zheng F L, Dong L L, Ding X B. Comprehensive evaluation on soil quality in the Water-wind Erosion region of the Loess Plateau. *Chinese Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8 (3): 67-76.

参考文献:

- [1] 唐克丽,熊贵枢,梁季阳,景可,张胜利,陈永宗 李世明. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化. 北京:中国科学技术出版社, 1993:91-149.
- [2] 唐克丽,王斌科,郑粉莉,张胜利,时明立,方学敏. 黄土高原人类活动对土壤侵蚀的影响. *人民黄河*, 1994, 2:13-16.
- [3] 郑粉莉,张成娥. 加速侵蚀对土壤腐殖酸动态变化的影响. *生态学报*, 1999, 19(2): 194-199.
- [4] 查轩,黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响. *山地学报*, 2001, 19(2): 109-114.
- [5] 张锋,郑粉莉,安韶山,李渝珍. 子午岭地区林地破坏加速侵蚀对土壤养分流失和微生物的影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12 (6): 826-833.
- [9] 刘世梁,傅伯杰,陈利顶,丘君,吕一河. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较. *长江流域资源与环境*, 2003, 12 (5): 422-426.
- [10] 张庆费,宋永昌,由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系. *生态学报*, 1999, 19(2): 174-179.
- [11] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量定义与评价方法. *土壤*, 1997, 29 (3): 113-120.
- [12] 郑昭佩,刘作新. 土壤质量及其评价. *应用生态学报*, 2003, 14 (1): 131-134.
- [13] 唐克丽,王斌科,郑粉莉,查轩,王文龙,蔡庆,白红英. 子午岭林区自然侵蚀和人为加速侵蚀剖析. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1993, (17): 17-28.
- [14] 米登山,蒋定生,刘明信,卢宗凡. 近几年子午岭森林破坏情况及其影响. *水土保持通报*, 1982, (5): 48-49.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编. *土壤物理性质测定方法*. 北京:科学出版社, 1978, 78-83.
- [16] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京:中国农业出版社, 2000: 25-97.
- [17] 许光辉,郑洪元. *土壤微生物分析方法手册*. 北京:农业出版社, 1986: 249-291.
- [18] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26 (3): 901-913.
- [19] 孙波,赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法. *地理科学进展*, 1999, 18 (2): 118-128.
- [20] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价研究. *应用生态学报*, 2005, 16 (10): 1843-1848.
- [21] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (3): 285-293.
- [22] 白文娟,郑粉莉,董莉丽,丁晓斌. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤质量综合评价. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (3): 67-76.

2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2;影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 22 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 22 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元