

黄土高原土石山区土地利用变化对生态系统服务的影响——以宁武县为例^{*}

刘秀丽^{1,2} 张 勃^{2**} 张调风² 何旭强²

(¹忻州师范学院地理系, 山西忻州 034000; ²西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730000)

摘 要 在全球生态系统服务水平急剧下降的背景下, 土地利用变化通过改变生态系统结构与功能进而对生态系统服务和人类福祉产生影响。以宁武县为研究区, 引入土地利用程度指数, 计算和分析当地土地利用变化过程; 构建黄土高原土石山区生态系统服务价值评估模型; 采用统计分析方法对土地系统和生态系统二者的耦合变化关系进行分析, 以期为黄土高原土石山区的土地利用、生态恢复和人类福祉的提高提供科学支撑。结果表明: 2001—2011 年, 随着土地利用程度的提高, 宁武县生态系统服务价值总量呈现逐年增加的趋势, 由 2001 年的 55.8 亿元, 增加到 2011 年的 63.2 亿元, 增加了 13.4%, 其变化过程主要受到供给服务和文化服务的影响; 土地利用程度与供给服务和文化服务的相关性较强, 而与调节服务和支持服务的相关性较差。

关键词 土地利用变化; 生态系统服务; 评价模型; 宁武县

中图分类号 F062.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)4-1017-06

Effects of land use change on ecosystem services in earth-rock mountainous area of Loess Plateau, Northwest China: A case study of Ningwu County. LIU Xiu-li^{1,2}, ZHANG Bo^{2**}, ZHANG Tiao-feng², HE Xu-qiang² (¹Department of Geography, Xinzhou Teachers University, Xinzhou 034000, Shanxi, China; ²College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730000, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 1017–1022.

Abstract: Under the background of the sharp decline of global ecosystem services level, land use change alters the structure and function of ecosystem, and further, affects the supply of ecosystem services and the human well-being. Taking Ningwu County as the study area and by using land use intensity index, this paper analyzed the regional land use change processes. In the meantime, an ecosystem services evaluation model for the earth-rock mountainous area of Loess Plateau was constructed through combining the material and value assessment methods, and the coupling changes between land systems and ecosystems were analyzed by statistical analysis methods, aimed to provide scientific support for the promotion of land use, ecological restoration, and human well-being in the earth-rock mountainous area of Loess Plateau. The results showed that in 2001–2011, with the promotion of land use intensity, the total ecosystem services value in the County increased yearly, from 5.58 billion yuan (RMB) in 2001 to 6.32 billion yuan in 2011, with an increment of 13.4%. The regional land use change processes were mainly affected by the provision services and cultural services. Land use intensity had a close correlation with the provision and cultural services, but poor correlation with regulation services and supporting services.

Key words: land use change; ecosystem services; evaluation model; Ningwu County.

^{*} 国家自然科学基金项目(40961038)、生态经济学省级重点学科项目(5002-021)和西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJCXGC-03-66)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2012-11-19 接受日期: 2012-12-25

地球生态系统是在不断运动和变化着的复杂的动态生命支持系统, 是人类赖以生存和发展的物质基础, 为人类社会、经济和文化生活等提供所必需的一切自然资源和环境条件。然而, 随着经济的发展、

人口的急剧增长和城市化进程的加快,特别是土地利用的急性扩张,导致生态系统服务水平急剧下降,生态负载不断加重。土地利用变化不仅带来地表结构的巨大变化,而且影响其物质循环和能量流动等生态过程,对整个生态系统的结构和功能造成影响,进而影响生态系统服务和人类福祉(Turner *et al.*, 1995)。探讨土地利用变化与生态过程之间的联系与互动,对区域土地可持续利用、生态环境保护、区域生态安全等方面研究均具有重要意义。近年来,众多的学者开始关注土地利用变化对生态系统服务的影响,然而,现有研究大多数是针对单一要素进行研究,或对由土地利用类型的变化引起的生态系统服务价值的变化进行研究,缺乏对土地利用变化影响区域生态系统服务的过程和机理方面的研究。国际上目前关于生态系统服务价值的分类、计算方法还存在诸多的争议,国内大多数的研究采用以 Costanza 等(1997)或谢高地等(2008)的研究成果为依据来估算区域生态系统服务的价值,这种方法存在很强的主观性,不能充分地反映特定区域生态系统的结构和特性,即使采取修正后的生态服务价值当量因子计算出来的结果仍然有很大的误差。

宁武县位于黄土高原中北部,境内山高沟深,土地贫瘠,属于典型的黄土高原土石山区,水土流失严重,水土流失面积占全县总面积的 62%,同时被山西省有关部门列为崩塌、滑坡、泥石流地质灾害易发

区。近年来,随着新农村建设的大力发展,城镇化水平的提高,以及宁武县退耕还林工程的实施等,当地的土地利用过程、生态环境变化均较明显。基于此,本文以宁武县为研究对象,研究土地利用变化对生态系统服务的影响,对于我国黄土高原土石山区土地利用,生态恢复和人类福祉的提高具有示范意义。文章采用土地利用程度指数计算并分析了宁武县土地利用变化过程;参考已有的研究成果,构建了黄土高原土石山区生态系统服务价值评估模型,对宁武县生态系统服务价值的演变过程进行探讨;采用统计分析方法对土地系统和生态系统二者的耦合变化关系进行分析。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

宁武县位于山西省北中部,地处 111°5'E—112°40'E,38°31'N—39°8'N,县北境以内长城为边,与朔州相邻;西北以黄花岭为界,与神池接壤;西南以荷叶坪山、芦芽山为屏,与五寨、岢岚隔山相望;南部与静乐相衔,东南以云中山与忻州为界;而东部与原平连通,见图 1。县境南北长 105 km,东西平均宽 45 km,总面积 1 936.4 km²,2011 年耕地面积 61.42 万亩。全县行政区划分为 4 镇 10 乡,464 个行政村。2011 年末全县总人口 16.68 万人,其中非农业人口 4.69 万人,农业人口 11.99 万人,农村劳动力 4.77

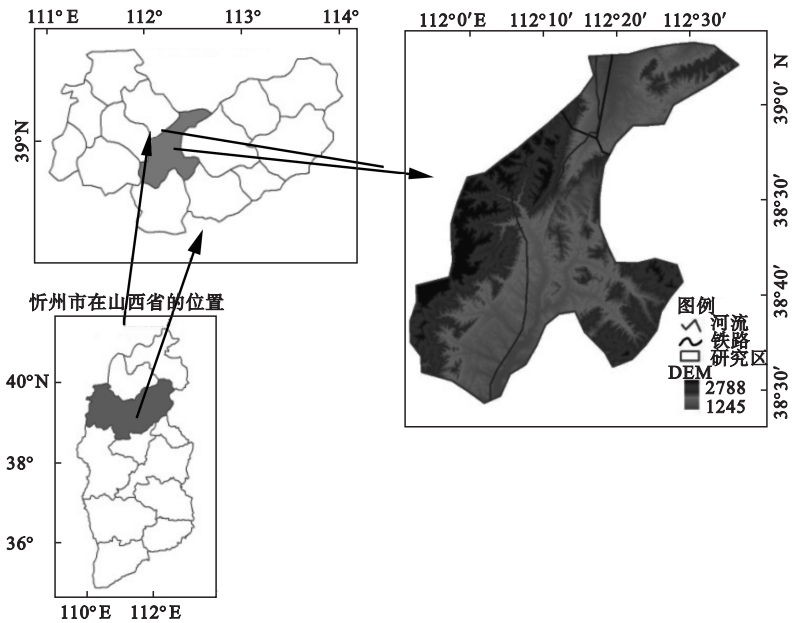


图 1 宁武县区位示意图
Fig.1 Position of the Ningwu County

万人。人口密度为 86.14 人·km⁻²。

1.2 数据来源及处理

土地利用/覆被数据来源于宁武县国土资源局提供的 2001—2011 年土地详查数据。社会经济数据来源于《宁武县国民经济资料》(2000—2011)以及其他相关文献。将宁武县土地利用/覆被分为耕地、林地、园地、草地、水域、建设用地、交通水利用地和其他用地 8 种类型。本文主要研究农田、森林和草地 3 种生态系统。其中,农田生态系统主要指耕地;森林生态系统主要涉及林地;草地生态系统主要指草地。其余的土地利用类型的生态系统服务价值暂不做评价。生态系统服务价值物质质量估算中使用的数据主要来源于其他相关研究中使用的参数。

1.3 土地利用程度指数

土地利用程度主要反映土地利用的广度和深度,它不仅反映了土地利用中土地本身的自然属性,同时也反映了人类因素与自然环境因素的综合效应(王秀兰,1999)。根据刘纪远(2005)等提出的土地利用程度综合分析方法,将土地利用程度按照土地自然综合体在社会因素影响下的自然平衡状态分为若干级,并赋予分级指数,其表达式为:

$$I = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \times 100 \tag{1}$$

式中:*I* 为研究区的土地利用程度指数,其数值越大,表示研究区越向人为干扰程度高的建设用地类型发展;*A_i* 为第 *i* 种土地利用类型的程度等级值;*C_i* 为第 *i* 种土地利用类型占总土地面积的比例;*n* 为研究区土地利用类型的数量,本研究中,*n*=8。

按照刘纪远(2005)的研究,土地利用类型的程度等级按大小可划分为 5 个等级,本文结合研究区的实际情况,对其略作修改(表 1)。

1.4 生态系统服务价值评估模型

目前,国际上关于生态系统服务的概念、分类和评价方法还存在诸多争议,到目前为止还没有形成系统的、规范化的生态系统服务价值评估体系

表 1 宁武县土地利用类型程度等级分级
Table 1 Classification of land use degree of Ningwu County

分级指数	土地利用类型
1	其他用地
2	林地、草地、水域
3	园地、耕地(旱地、水田)
4	建设用地(城镇、居民、工矿、交通水利用地)

(赵士洞和张永明,2006)。本文参考千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment,2005)中对生态系统服务的定义和分类,将生态系统服务概括为人类从生态系统中所获得的收益,将生态系统服务分为四类:供给服务(提供食物、水、木材以及纤维等);调节服务(调节气候、洪水、疾病、废弃物以及水质等);文化服务(提供消遣娱乐、美学享受以及精神收益等)以及维持这些服务所必需的支持服务(土壤形成、光合作用和养分循环等)。采用物质与价值量相结合的方法构建生态系统服务价值评估模型(石龙宇等,2010)。基于评价方法的成熟性和数据的可得性,文章对以下生态系统服务进行评价(表 2)。首先进行物质质量的估算,然后采用价值量评价方法估算生态系统服务价值。具体评价方法见表 2。表 2 涉及的评价参数取值、文献来源见表 3。

2 结果与分析

2.1 土地利用/覆被变化过程

从图 2 可以看出,宁武县土地利用程度以 2005 年为分界点可以分为 2 个阶段,2001—2005 年,土地利用程度呈现逐年减小的趋势,这与宁武县实施退耕还林工程有重大关系,宁武县退耕还林工程从 2002 年实施到 2005 年底结束,从时间上看正好与本研所得出的结论相一致;2005—2011 年,土地利用程度呈现逐年增大的趋势,主要原因是宁武县大力推进新农村建设,以及社会经济的发展,导致交通、工矿、城市建设用地等明显增加。总体上看,2001—2011 年,宁武县土地利用方式正在由以耕地为主,逐渐向以林地和建设用地为主的结构转变。

2.2 生态系统服务价值变化过程

按照构建的宁武县生态系统服务价值评估模

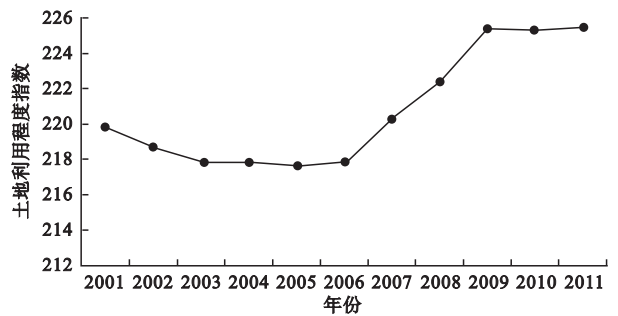


图 2 2001—2011 年宁武县土地利用综合程度指数
Fig. 2 Land use degree of Ningwu County from 2001 to 2011

表 2 宁武县生态系统服务价值评估模型
Table 2 Evaluation model of ecosystem service of Ningwu County

服务类型	物质量评价	价值量评价	计算公式
食物产品与非食物产品供给	食物产品:谷物及其他作物,蔬菜 非食物产品:木材、饲料、饲草	市场价值法	$V = \sum_{i=1}^n Q_i \times P_i$
提供收入	无	市场价值法	$V = \sum_{i=1}^n E_{fi} + E_t$
气候调节	初级生产过程中固定 CO ₂ 量转化为纯碳量	成本避免法	$V = \sum_{i=1}^n NPP_i \times A_i \times 1.63 \times \frac{12}{44} \times C_o$
	释放氧气量	工业制氧法	$V = \sum_{i=1}^n NPP_i \times A_i \times 1.2 \times C_o$
水源涵养	土壤的蓄水量	替代工程法	$V = \sum A_i \times h \times p \times V_g$
净化空气	吸收 SO ₂ 和滞尘	重置成本法	$V = \sum a_i \times A_i \times C_{ai}$
维持营养物质循环	维持的 N、P、K 三种元素的循环量	重置成本法	$V = \sum_{i=1}^n Q_{fi} \times P_f$
保持生物多样性	无	替代市场法	$V = \sum_{i=1}^n (P_{wi} + P_{pi}) \times A_i$
防风固沙	与裸地比较所固定的风沙量	替代市场法	$V = \sum_{i=1}^n (P_{wi} + P_{wi} \times A_i)$
控制侵蚀	与裸地比较侵蚀减少量	重置成本法	$V = \sum_{i=1}^n (E_{ti} - E_{oi}) \times A_i \times B_e$
处理废弃物	农田生态系统处理粪便量	重置成本法	$V = \sum_{i=1}^n D_i \times A_i \times C_d$
游憩	无	旅行费用法	$V = \sum_{i=1}^n P_{ti} \times 0.9$

表 3 评估模型中参数含义及出处
Table 3 Meanings and sources of the parameters in the evaluation model

符号	含义	单位	出处
V	生态系统服务价值	万元	
Q_i	第 i 种产品的产量	t	宁武县统计局,2001–2011
P_i	第 i 种产品的价格	万元 · t ⁻¹	宁武县统计局,2001–2011
E_i	第 i 种土地利用类型产生的收入	元 · a ⁻¹	宁武县统计局,2001–2011
E_t	第 t 年退耕还林的补贴收入	元	宁武县统计局,2001–2011
NPP_i	第 i 种土地利用类型的净初级生产力	kg · hm ⁻² · a ⁻¹	李晶和任志远,2011
A_i	第 i 种土地利用类型的面积,	hm ²	宁武县国土资源局
C_c	瑞典碳税率	元 · t ⁻¹ C	刘某承等,2010
C_o	工业制氧成本	元 · kg ⁻¹	刘某承等,2010
h	土壤表层土平均厚度	m	薛达元等,1999
p	土壤粗孔隙度	%	薛达元等,1999
V_g	替代水利工程的单位价值	元 · m ⁻³	王兵等,2007
a_i	第 i 类土地利用类型吸收污染物的量	kg · hm ⁻² · a ⁻¹	田国行等,2007;高旺盛和董孝斌,2003
C_{ai}	处理第 i 种污染物的工业成本	元 · kg ⁻¹	田国行等,2007
Q_{fi}	第 i 种生态系统参与养分循环的物质质量	kg · hm ⁻² · a ⁻¹	田国行等,2007
P_f	化肥的平均价格	元 · t ⁻¹	田国行等,2007
P_{wi}	第 i 种生态系统破坏造成的生物多样性损失值	元 · 人 ⁻¹ · a ⁻¹	赖亚飞等,2006
P_{pi}	保护第 i 种生态系统的支付意愿	元 · 人 ⁻¹ · a ⁻¹	赖亚飞等,2006
Q_{ui}	第 i 种土地利用类型单位面积固沙量	t · hm ⁻²	韩永伟等,2011
P_{uf}	因防风固沙功能而减少的损失	元 · hm ⁻²	韩永伟等,2011
$E_{ti}-E_{oi}$	第 i 种土地利用类型单位面积的土壤保持量	t · hm ⁻² · a ⁻¹	李文华,2008
B_e	单位面积农田收益	元 · hm ⁻²	李文华,2008
D_i	第 i 种农田生态系统的施肥量	kg · hm ⁻² · a ⁻¹	唐衡等,2008
C_d	粪便处理成本	元 · kg ⁻¹	唐衡等,2008
P_{ti}	旅游收入	元 · a ⁻¹	宁武县统计局,2001–2011

型,根据表 2,计算出宁武县 2001—2011 年生态系统服务价值量(表 4)。宁武县生态系统服务价值总量由 2001 年的 55.8 亿元,增加到 2011 年的 63.2 亿元,增加了 13.4%。2001—2011 年总体上呈现上升的趋势,具体可以分为 2 个发展阶段,2001—2006 年增长率较明显,为 11.29%,主要原因是宁武县自 2002 年起实施退耕还林工程,为期 4 年,导致宁武县土地利用变化较大,大量耕地转变为林地(生态林),土地生态系统的调节服务价值和支持服务价值增长明显;2006—2011 年,宁武县生态系统服务的价值量变化较小,仅为 1.88%。2001—2011 年,供给服务、调节服务、支持服务和文化服务的变化率分别为 159.30%、10.49%、9.69% 和 685.71%。值得注意的是,2006—2011 年调节服务和支持服务呈现轻微的负增长,主要原因是退耕还林工程结束,部分林地、草地被牛羊等牲畜破坏,以及一些人为的破坏,加上实施新农村建设工程,占用了一部分耕地、草地和林地,导致土地生态系统的调节功能和支持功能下降,这个发展趋势是非常值得警惕的。从生态系统服务的子类型来看,宁武县主要的生态系统服务类型为水源涵养、控制侵蚀和气候调节,2006—2011 年,这 3 种生态系统服务类型的贡献率均呈现增加的趋势,说明退耕还林工程效益良好。

2.3 土地系统和生态系统的耦合

使用 SPSS 16.0 软件对宁武县土地利用程度和各种生态系统服务价值进行相关性分析,计算 Pearson 相关系数。结果表明,宁武县土地利用程度变化与供给服务、调节服务、支持服务和文化服务的相关系数均为正值,而与供给服务和文化服务的相关

性最强,相关系数分别为 0.937 和 0.801;与调节服务和支持服务的相关性较弱,相关系数仅为 0.215 和 0.023;与生态系统服务价值总量的变化相关性一般,相关系数仅为 0.392。显著性检验结果表明,土地利用程度变化对供给服务和文化服务价值变化影响比较显著(通过了 0.05 的置信度检验),而与调节服务、支持服务和生态系统服务价值的总量之间的相关性不明显。

3 结论与讨论

3.1 结论

通过对土地利用程度的计算可得,宁武县土地利用程度分为 2 个阶段,2001—2005 年,土地利用程度呈现逐年减小的趋势,2005—2011 年,土地利用程度呈现逐年增大的趋势。总体上看,2001—2011 年,宁武县土地利用程度增加,土地利用方式正在由以耕地为主,逐渐向以林地和建设用地为主的结构转变。

本文构建了黄土高原土石山区生态系统服务价值评估模型,2001—2011 年,随着宁武县土地利用程度的提高,宁武县生态系统服务价值总量呈现逐年增加的趋势,由 2001 年的 55.8 亿元,增加到 2011 年的 63.2 亿元,增加了 13.4%,其变化过程主要受到供给服务和文化服务的影响。

土地利用变化程度与不同的生态系统服务类型的相关性差异明显,与供给服务和文化服务的相关性较强($P<0.05$);与调节服务和支持服务的相关性较差;与生态系统服务价值总量的变化相关性一般。

3.2 讨论

宁武县属于黄土高原土石山区,土地贫瘠,水土流失严重,其社会经济发展的出发点是生态环境的改善。虽然土地利用程度的提高说明该区域经济的增长,而且生态系统服务的总价值呈增长趋势,但不能忽视的是,2006—2011 年,其调节服务和支持服务呈现负增长,从长远来看,势必会成为该区社会经济发展的阻碍因素。

本文构建的生态系统服务价值评估模型具有一定的局限性。首先,对于生态系统服务的分类,迄今没有统一的说法,文章采用“千年生态系统评估(MA)”中对生态系统服务的分类,其支持服务是作为其他 3 种服务的基础,因此,在计算中可能会导致一部分生态系统服务价值的重合(张永民,2007);其次,本文没有估算当地生态系统服务的所有类型,

表 4 宁武县 2001—2011 年生态系统服务价值(万元)
Table 4 Ecosystem values of Ningwu County from 2001 to 2011

生态系统服务类型		价值量		
		2001 年	2006 年	2011 年
供给服务	食物产品供给	2921	2999	4342
	非食物产品供给	426	452	340.8
	提供收入	6537	7984.5	20941.7
调节服务	处理废弃物	2317.2	2589.3	2681.8
	气候调节	86434.4	104184.5	104227.9
	防风固沙	3062.4	3408.2	3362.9
	控制侵蚀	183256.3	199743.0	197868.8
	水源涵养	222080.1	241356.9	241253.8
支持服务	净化空气	16055.5	18309.8	17683.5
	维持营养物质循环	9294.3	9268.1	9449.6
	保持生物多样性	25159.1	29588.9	28345.2
文化服务	消遣和生态旅游	252	891	1980
总计		557795.3	620775.2	632478.0

如遗传资源供给、疾病控制、自然灾害控制、授粉、宗教等,导致计算结果和其他相关研究具有较大的差异;最后,模型采用的参数大多数是借鉴相关研究的经验数据,导致其在适用性方面存在不足。下一步的研究将重点完善生态系统服务价值评估模型,加强长期的野外调查和定点实验监测,来获取比较精确的模型参数,进一步提高该模型的科学性和适用性。

土地利用变化对生态系统服务影响的过程和机理比较复杂,本文仅采取相关系数来研究二者的耦合关系虽能说明一些问题,但单纯的绝对值分析并不能深层次的表达二者的关系。因此,为了充分、准确地把握土地系统变化和生态系统变化之间的内在联系,还需要进一步研究。

参考文献

- 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 2008. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, **23**(5): 911-919.
- 王秀兰,包玉海. 1999. 土地利用动态变化研究方法探讨. 地理科学进展, **18**(1): 81-87.
- 刘纪远,张增祥,庄大方,等. 2005. 20世纪90年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究. 北京: 科学出版社.
- 石龙宇,崔胜辉,尹锴,等. 2010. 厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响. 地理学报, **65**(6): 708-714.
- 李晶,任志远. 2011. 基于GIS的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价. 中国农业科学, **44**(14): 2943-2950.
- 刘某承,李文华,谢高地. 2010. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. 生态学杂志, **29**(3): 592-597.
- 薛达元,包浩生,李文华. 1999. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估. 中国环境科学, **19**(3): 247-252.
- 王兵,李少宁,郭浩. 2007. 江西省森林生态系统服务功能及其价值评估研究. 江西科学, **25**(5): 553-559, 587.
- 田国行,田耀武,宇振荣,等. 2007. 高速公路绿地生态系统与农田生态系统服务价值的对比研究——以郑州西南环高速公路为例. 中国生态农业学报, **15**(4): 148-152.
- 高旺盛,董孝斌. 2003. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例. 自然资源学报, **18**(2): 182-188.
- 赖亚飞,朱清科,张宇清,等. 2006. 吴旗县退耕还林生态效益价值评估. 水土保持学报, **20**(3): 83-87.
- 韩永伟,拓学森,高吉喜,等. 2011. 黑河下游重要生态功能区植被防风固沙功能及其价值初步评估. 自然资源学报, **26**(1): 58-65.
- 李文华. 2008. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社.
- 唐衡,郑渝,陈阜,等. 2008. 北京地区不同农田类型及种植模式的生态系统服务价值评估. 生态经济, (7): 56-59, 114.
- 赵士洞,张永民. 2006. 生态系统与人类福祉——千年生态系统评估的成就、贡献和展望. 地球科学进展, **21**(9): 895-902.
- 张永民. 2007. 生态系统与人类福祉: 评估框架. 北京: 中国环境科学出版社.
- 宁武县统计局. 2001-2011. 宁武县国民经济资料. 宁武县: 宁武县统计局.
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253-260.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press.
- Turner BL II, Skole D, Sanderson S, *et al.* 1995. Land-use and land-cover change: Science/research plan. IGBP Report No. 35 and HDP Report No. 7. Stockholm: IGBP and HDP Secretariats.

作者简介 刘秀丽,女,1982年生,博士研究生,讲师,主要从事区域环境与资源开发研究,发表论文10篇。E-mail: lxl820113@163.com.

责任编辑 王伟