基于 Hyperion 和 ASTER 影像的喀斯特石漠化评价指标提取对比研究

熊 鹰[1,2,3], 岳跃民[2,3], 王克林[2,3]

(1. 长沙理工大学 资源环境系, 湖南 长沙 410114; 2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 3. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘　要: 中国西南喀斯特地区以石漠化为特征的生态环境退化现象严重,遥感是获取大尺度石漠化评价指标的主要手段。但目前还没有直接从遥感图像快速、客观有效地提取石漠化评价指标的应用。基于植被指数(NDVI)、石漠化综合光谱指数(KRDSI)和木质素—纤维素吸收指数(LCA),对比分析利用 Hyperion 高光谱遥感影像及其模拟的 ASTER 多光谱遥感影像直接提取石漠化评价指标的可行性和精度。研究表明,利用 Hyperion 高光谱影像能够比较有效地直接反演绿色植被、干枯植被、裸土等的覆盖信息,但由于不同碳酸盐岩及其不同侵蚀程度的光谱特征差异,直接反演基岩裸露的精度较低;而利用 ASTER 多光谱影像能够直接有效提取直接反演绿色植被、裸土等的覆盖信息,但由于 ASTER 影像波段设置的局限性,使其直接提取干枯植被盖度和基岩裸露率的效果较差。

关键词: 石漠化; 评价指标; 裸岩率; 植被盖度; Hyperion; ASTER

文献标识码: B　　**文章编号**: 1000-288X(2013)03-0186-05　　**中图分类号**: P931.5, TP79

Comparative Study of Indicator Extraction for Assessment of Karst Rocky Desertification Based on Hyperion and ASTER Images

XIONG Ying[1,2,3], YUE Yue-min[2,3], WANG Ke-lin[2,3]

(1. *Department of Resources and Environmental Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan* 410114, *China*; 2. *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hu'nan* 410125, *China*; 3. *Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi* 547100, *China*)

Abstract: In the karst regions of Southwest China, rocky desertification is one of the most serious problems of land degradation. Because of the inherent merits of macro scale, frequency, efficiency and synthesis, remote sensing is the promising method to monitor and assess karst rocky desertification. However, existing remote sensing methods can not directly be exploited to extract the information on karst rocky desertification owing to the high complexity and heterogeneity of karst environments. Based on NDVI, karst rocky desertification synthesis indices (KRDSI) and lignin—cellulose absorption index (LCA), this study compared the feasibility and accuracy of indicator extraction for the assessment of karst rocky desertification with Hyperion and simulated ASTER images. Results showed that Hyperion imagery can be used to efficiently and directly extract the information on the fractional covers of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil, while the proportion of exposed bedrock was not so good due to the different types and weathering processes of carbonate rocks. As for multi-spectral image, ASTER can be used to estimate the fractional cover of photosynthetic vegetation and bare soil, but could not be utilized for accurate estimation of the fractional covers of exposed bedrock and non-photosynthetic vegetation due to the limits of spectral bands and spectral resolution.

Keywords: **karst rocky desertification; evaluation indicator; proportion of exposed bedrock; fractional vegetation cover; Hyperion; ASTER**

收稿日期: 2012-07-06　　**修回日期**: 2012-09-10

资助项目: 国家自然科学基金项目"基于光谱和空间邻域分析的石漠化信息遥感反演研究"(41001287); 湖南省自然科学基金项目"快速城市化背景下长株潭城市群景观动态模拟与预测研究"(10JJ5017)

作者简介: 熊鹰(1977—),男(汉族),湖南省常德市人,博士,副教授,主要从事生态环境遥感、土地利用及其变化研究。E-mail: xiong2001ying@126.com。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

我国西南喀斯特区地处亚热带季风性湿润气候区，由于地形破碎，土被不连续，土壤保水能力低；植被以石生旱生为主，片段化严重，与同纬度的其他地区差异明显，加上人类不合理的土地利用，导致植被遭受破坏，土壤侵蚀严重，基岩大面积裸露，产生了以石漠化为特征的生态环境退化[1-2]。石漠化的主要宏观表现为植被退化、森林覆盖率降低、水土流失、耕地逐渐减少、土地退化、基岩逐步裸露、生物多样性逐渐减少、生物结构趋于单一，分布总体集中、局部随机分散[3]。遥感技术具有宏观、快捷、经济、信息综合等优势，是快速、大面积石漠化定性评价、信息定量提取必不可少的手段，在喀斯特石漠化信息提取中有着巨大的潜力和应用价值。然而，由于喀斯特生态系统及石漠化过程的复杂性及现有遥感技术自身的不足（空间分辨率、混合像元效应等），使喀斯特石漠化遥感信息提取还存在诸多不确定性[4]。

石漠化信息提取的主要目的是为石漠化评价和分级提供基础和理论依据。对石漠化表征信息的指标选取（包括石漠化评价指标和石漠化分类分级指标），目前仍没有统一的方案[3,5-6]，分类标准和分类方案问题也是我国西南喀斯特石漠化研究的一个难点，也是影响石漠化遥感信息提取的一个重要因素。这主要是由于石漠化本身的复杂性所决定的，从石漠化的表现看，石漠化是类似荒漠化的特殊景观，岩石裸露率及其植被覆盖度是石漠化主要的地面表现特征，也是评价石漠化的关键指标[7]；同时，石漠化又是一种动态的土地退化过程，是植被、基岩、土被等多种地表覆盖要素特征的综合反映，由于植被的物候特征，已落叶植被及其凋落物等干枯的失去光合作用能力的植被覆盖、土壤覆盖等对表征石漠化信息也有重要作用，评价石漠化时需要同时考虑多种地物类型覆盖[8]。因此，石漠化信息遥感提取需要考虑遥感技术的特点并结合石漠化监测、评价专业的应用需求去研究，遥感主要是用来提供石漠化关键指标的定量、可靠监测方法。目前，还没有直接从遥感图像快速、客观有效提取绿色植被、干枯植被、裸露土壤和基岩覆盖信息的尝试和应用。本研究对比分析利用 Hyperion 高光谱和 ASTER 多光谱遥感图像提取石漠化评价指标的方法，为促进遥感技术在石漠化信息快速提取中的应用提供方法和应用试验。

1　研究方法

1.1　数据来源

高光谱遥感数据源方面，本研究利用 Hyperion 高光谱影像，获取数据时间为 2008 年 3 月 3 日，该时段处于植被生长凋落期，此时绿色植被、干枯植被、裸土等喀斯特主要地物类型的分布及其光谱特征差异明显。获取的高光谱数据共有 242 个波段，光谱范围为 400～2 500 nm，光谱分辨率达 10 nm，地面分辨率为 30 m。通过波段选择、辐亮度获取、坏线替换、条纹去除、Smile 效应检测与纠正、几何与大气校正等预处理获得地面反射率图像[9]。多光谱数据源方面，由于石漠化表征信息的光谱特征在短波红外波段范围（SWIR，2 000～2 400 nm）附近具有较强的光谱特征差异，应考虑利用在短波红外波段具有较多波段的多光谱影像来发展石漠化评价指标的遥感反演方法。ASTER 多光谱影像在短波红外波段具有 6 个波段，是目前多光谱影像中在短波红外波段拥有最多波段的影像。虽然参数 ASTER 与 TM 相似，但 ASTER 有其自身的特点：(1) 在可见光和近红外光谱范围，图像数据的分辨率较高（15 m）；(2) 在沿轨迹方向上具有立体覆盖能力；(3) 在短波红外具有较高的光谱分辨率。因此，本研究考虑基于多光谱影像 ASTER 来反演喀斯特石漠化评价关键指标，同时由于喀斯特地区多阴雨天气，很难获取与 Hyperion 影像同步的 ASTER 遥感影像，本研究采用的 ASTER 影像为 Hyperion 高光谱影像根据 ASTER 的光谱响应函数和空间分辨率重采样后的模拟图像。

1.2　石漠化评价指标选择

现有石漠化评价和分级主要分类方案均将地表要素覆盖信息作为石漠化表征信息的关键指标，如植被覆盖度、基岩裸露率、土被覆盖等。基于上述考虑，从遥感信息的角度，参考“土地荒漠化监测方法”（GB/T20483—2006）和荒漠化的评价方法——主要依据地表形态和生态状况的变化确定植被盖度、裸沙地占地百分比和土壤质地[10]，结合现有主要分类方案，并充分考虑光学遥感技术的特点，选取植被覆盖度、基岩裸露率、土被覆盖等地表覆盖信息作为石漠化遥感评价因子；同时，由于植被的物候变化，已落叶植被及其凋落物等干枯的失去光合作用能力的植被覆盖对表征石漠化信息也有重要作用[8]。因此，本研究主要选取绿色植被覆盖（photosynthetic vegetation，PV）；失去光合作用能力的干枯植被覆盖（non-photosynthetic vegetation，NPV）；土被覆盖（Soil）；基岩裸露率（Rock）等作为石漠化评价的主要遥感提取指标。

1.3　石漠化指标遥感提取方法

(1) Hyperion 高光谱提取方法　绿色植被盖度的提取采用传统的植被指数法。本研究基于归一化植被指数（NDVI），分别利用 Hyperion 和 ASTER 影像

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

提取植被盖度。对于Hyperion高光谱影像，采用基于地物实测光谱构建的石漠化综合指数(karst rocky desertification synthesis indices，KRDSI)[11]来提取失去光合作用能力的植被覆盖、土被覆盖和基岩裸露率。

(2) ASTER多光谱提取方法 由于木质素—纤维素吸收指数(lignin—cellulose absorption index，LCA)与干枯植被覆盖和裸土有较好的线性关系，本研究利用LCA指数和来估算失去光合作用能力的植被覆盖和土被覆盖。LCA是面向多光谱影像ASTER发展的指数，用来衡量黏土矿物、羟基的吸收特征(ASTER影像的第6波段)和纤维素、木质素的吸收特征(ASTER影像的第5，8波段附近)，其计算公式如下[12]：

$$LCA=100\times[(ASTER6-ASTER5)+(ASTER6-ASTER8)]$$

式中：ASTER5，ASTER6，ASTER8——对应于ASTER影像在短波红外波段的第5波段(2.145～2.185 μm)、第6波段(2.185～2.225 μm)和第8波段(2.295～2.365 μm)的反射率。

由于只假定地物组成为绿色植被(PV)、干枯植被(NPV)、裸岩和裸土(Soil)，因此，在获取了PV，NPV和Soil的覆盖信息后，裸岩覆盖信息为：100%－PV－NPV－Soil，从而可以获得基岩裸露率。

1.4 评价指标提取方法验证

由于石漠化地区地物复杂度高，即便是高空间分辨率数据也存在严重的混合像元问题，利用高空间分辨率遥感数据也较难准确提取其地物覆盖信息，因此，本研究结果验证主要是基于野外实地考查验证，验证点的选取采用分层随机采样的方法[13]。图像区域覆盖范围主要位于广西河池市大化县七百弄乡附近，处于广西大化七百弄国家地质公园范围内，属于发育极为典型的大面积喀斯特高峰丛深洼地地貌，石漠化比较严重。加拿大皇家学会院士、前国际洞穴协会主席D.福特教授认为七百弄喀斯特地区是世界上地表喀斯特主要类型中的非凡实例，因此该研究区域属于典型的喀斯特石漠化地区。基于ENVI遥感图像处理软件对地物丰度图分层随机产生36个调查验证点，但由于喀斯特地区多为崎岖的山区，个别验证点的可达性差，只调查了其中21个分层随机生成的验证点，样点大小为60 m×60 m，每个样点采用目视估算、照相法和样线法相结合的方法[14-15]来估算绿色植被、干枯植被、裸土和裸露基岩等的覆盖度信息。遥感影像估算的4种地物的覆盖度信息根据其GPS坐标位置从各种地物的反演图中提取[16]。

同时，利用2个指标进行各种地物覆盖信息提取效果优劣的评价。首先利用所有地面调查验证点的实测地物覆盖度与相应的基于遥感影像反演的覆盖信息进行线性回归，决定系数R^2和交叉验证的均方根误差RMSE作为判断算法表现的指标。

2 结果与讨论

2.1 基于Hyperion高光谱影像的石漠化评价指标提取

从利用Hyperion高光谱影像的石漠化评价指标提取结果看，植被覆盖度越高的地区，其基岩裸露率越低，这也说明地表植被的覆盖状况较好地反映了石漠化的分布情况。植被覆盖度的高低与石漠化的程度呈负相关关系，石漠化程度越高，植被覆盖度越低；石漠化程度越低，植被覆盖度越高[3]。同时从干枯植被NPV的反演结果看，由于本研究获取的Hyperion图像为植被生长的凋落季节，大部分区域的干枯植被NPV覆盖度为20%～30%，因此评价石漠化程度时，应考虑植被的物候特征影响，干枯植被NPV覆盖度也是不可忽视的表征石漠化信息的重要地表要素。另外，从反演的裸露土壤覆盖信息可以看出，绝大部分地区的土壤覆盖在10%以下，而土壤覆盖度为10%～20%的较高覆盖区域分布随机且零散，这也间接证实了喀斯特地区地表复杂度高，地物交错分布且土被不连续。

地面实测点验证结果表明(表1)，实测绿色植被覆盖度与利用高光谱Hyperion图像反演的植被覆盖度的线性回归的决定系数R^2和交叉验证均方根误差RMSE分别为0.905 8和0.047 0，说明Hyperion能够有效提取绿色植被的覆盖度信息。对于NPV和Soil覆盖信息来说，利用KRDSI和Hyperion高光谱图像也能够比较有效地提取，其R^2分别为0.682 8和0.717 3。但基岩裸露率的提取效果较差，R^2和RMSE分别为0.529 5和0.105 9，这主要是由于构建石漠化综合指数KRDSI时，没考虑不同碳酸盐岩类型(石灰岩和白云岩)及不同侵蚀程度碳酸盐岩的光谱特征差异，导致基于Hyperion和KRDSI反演裸岩率的效果较差，后续研究需考虑碳酸盐岩的光谱特征差异对石漠化综合指数模型进行改进。同时，基于Hyperion图像反演的地物覆盖信息精度略低于基于地面实测光谱的估算精度，这主要是因为KRDSI是基于ASD光谱仪实测光谱构建的，直接将其应用于Hyperion图像光谱时存在尺度差异。以上这些结果表明，基于高光谱图像Hyperion能够比较有效地直接反演石漠化评价指标。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　实测地物覆盖信息与 Hyperion 反演结果的线性回归分析结果(R^2)及交叉验证(RMSE)

指 标	绿色植被	干枯植被	裸土	裸露基岩
R^2	0.905 8	0.682 8	0.717 3	0.529 5
RMSE	0.047 0	0.059 3	0.039 0	0.105 9

2.2　基于 ASTER 多光谱影像的石漠化评价指标提取

ASTER 影像为 Hyperion 高光谱影像根据 ASTER 的光谱响应函数和空间分辨率重采样后的图像。从具体的反演结果看,ASTER 多光谱图像反演地物覆盖信息结果有效性的验证仍采用与 Hyperion 高光谱图像相同的验证方法。

4 种实测地物覆盖信息与模拟的 ASTER 图像反演的地物覆盖信息的线性回归的决定系数 R^2 与交叉验证均方根误差 RMSE 的结果如表 2 所示,可以看出模拟的 ASTER 多光谱影像能够比较有效地反演绿色植被和裸土的覆盖信息,而对基岩裸露率和干枯植被盖度的估算效果较差,其实测覆盖信息与 ASTER 反演结果的线性回归的决定系数 R^2 仅为 0.478 9和 0.454 5,特别是反演较高的 NPV 覆盖信息时,容易造成对较高 NPV 覆盖信息的高估。这主要是由于 ASTER 波段设置的局限性造成的,在短波红外波段(SWIR,2 000～2 400 nm)附近,ASTER 仅有的 6 个波段不能有效识别 NPV,Soil 和 Rock 的光谱特征差异,致使其识别不同非绿色植被覆盖信息的能力较低。

基于木质素—纤维素指数 LCA 和 ASTER 多光谱影像只能比较有效提取高度异质性地物分布的喀斯特地区的裸土覆盖信息,而不能直接有效提取干枯植被盖度和基岩裸露率。因此,基于多光谱 ASTER 影像能较有效地直接提取绿色植被和裸土的覆盖信息,而对干枯植被盖度和基岩裸露率的提取效果较差。

表 2　实测地物覆盖信息与 ASTER 反演结果的线性回归结果(R^2)及交叉验证(RMSE)

指 标	绿色植被	干枯植被	裸土	裸露基岩
R^2	0.609 9	0.454 5	0.695 3	0.478 9
RMSE	0.095 6	0.077 8	0.040 5	0.111 4

2.3　石漠化评价指标高光谱和多光谱提取精度对比分析

石漠化评价关键指标中的绿色指标盖度和土被盖度,利用 Hyperion 高光谱影像和模拟的 ASTER 多光谱影像都能比较有效地提取,但相对于高光谱图像 Hyperion 反演石漠化评价指标的结果来说,模拟的多光谱图像 ASTER 的反演精度较低(表 1—2)。而干枯植被盖度和基岩裸露率,只有 Hyperion 高光谱影像能够比较有效地直接提取,由于波段设置及光谱分辨率的限制,ASTER 多光谱遥感影像不能有效直接提取。然而,鉴于高光谱遥感数据源的可获取性及其成本,高光谱遥感只能应用于小区域的石漠化信息遥感监测研究。因此,应大力发展基于多光谱遥感的石漠化评价指标遥感反演方法,本文提出的基于 ASTER 多光谱图像的石漠化评价指标遥感反演方法,促进了利用多光谱遥感图像来直接快速提取石漠化信息,但是如何进一步提高其反演精度是未来重点研究的内容。对于高光谱遥感应用于石漠化信息提取研究来说,应完善构建的基于高光谱遥感的石漠化综合指数 KRDSI,使其能够更加准确地直接估算基岩裸露率。同时,应拓展 KRDSI 在多光谱遥感图像中的应用,使遥感技术能够准确、快速、客观、直接应用于大区域尺度的石漠化遥感调查与监测。

3　结 论

利用 Hyperion 高光谱遥感影像及其模拟重采样的 ASTER 多光谱影像,对比分析了基于高光谱遥感和多光谱遥感图像的石漠化评价指标遥感反演方法,研究表明,基于 Hyperion 高光谱影像来反演石漠化评价指标,可以利用传统植被指数和石漠化综合指数 KRDSI,能够比较准确地直接反演绿色植被、干枯植被、裸土等的覆盖信息,但由于不同碳酸盐岩及其不同侵蚀程度的光谱特征差异,直接反演基岩裸露的精度较低。基于 ASTER 多光谱影像来反演石漠化评价指标,可以结合植被指数和 LCA 指数,能够比较准确地直接反演绿色植被、裸土等的覆盖信息,但由于 ASTER 影像波段设置的局限性,使其直接提取干枯植被盖度和基岩裸露率的效果较差。

由于喀斯特石漠化景观的高度异质性,需要更多的诊断性光谱通道来识别不同石漠化地物的光谱响应特征,高光谱遥感能发挥其技术优势。同时,由于传感器波段细分后,仪器的信噪比就会降低,条带与噪声比较明显,光谱分辨率与信噪比存在固有的矛盾。此外,高光谱数据获取比较困难,航空遥感高光谱数据受飞行试验的限制,而且费用较高;而航天高光谱数据信噪比偏低、幅宽窄,在一定程度上使其实用性受到限制。因此,高光谱遥感比较适合应用于小区域的石漠化信息遥感监测研究,应努力发展基于多光谱遥感的石漠化评价指标遥感反演方法,同时,完善石漠化综合指数 KRDSI 并拓展其在多光谱遥感影像中的应用。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[参 考 文 献]

[1] 王世杰,李阳兵.喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J].地球科学进展,2007,22(6):474-483.

[2] 袁道先,章程.岩溶动力学的理论探索与实践[J].地球学报,2008,29(3):355-365.

[3] 鞠建华,戴传固,况顺达,等.岩溶石漠化遥感监测与防护规划[M].北京:地质出版社,2006.

[4] 岳跃民,王克林,张兵,等.喀斯特石漠化信息遥感提取的不确定性[J].地球科学进展,2011,26(3):266-274.

[5] Wang Shijie, Liu Qiming, Zhang Dianfa. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation and Development, 2004,15(2):115-121.

[6] 王世杰,李阳兵.生态建设中的喀斯特石漠化分级问题[J].中国岩溶,2005,24(3):192-195.

[7] 李瑞玲,王世杰,周德全,等.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的空间相关分析[J].地理学报,2003,58(2):314-320.

[8] 岳跃民,张兵,王克林,等.石漠化遥感评价因子提取研究[J].遥感学报,2011,15(4):722-736.

[9] 谭炳香,李增元,陈尔学,等.EO-1 Hyperion高光谱数据的预处理[J].遥感信息,2005(6):36-41.

[10] 高尚武,王葆芳,朱灵益,等.中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J].林业科学,1998,34(2):1-11.

[11] Yue Yuemin, Zhang Bing, Wang Kelin, et al. Spectral indices for estimating ecological indicators of karst rocky desertification[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010,31(8):2115-2122.

[12] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2000,74(2):229-239.

[13] 陈晓玲,龚威,李平湘,等.遥感数字图像处理导论[M].北京:机械工业出版社,2007.

[14] Wilson A D, Abraham N A, Barratt R, et al. Evaluation of methods of assessing vegetation change in the semi-arid rangelands of southern Australia[J]. Australian Rangeland Journal, 1987,9(1):5-13.

[15] Zhou Qiming, Robson M, Pilesjo P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(9):1815-1820.

[16] Liu Liangyun, Jing Xia, Wang Jihua, et al. Analysis of the changes of vegetation coverage of western Beijing mountainous areas using remote sensing and GIS[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,153(1/4):339-349.

(上接第62页)

[6] Fu Bojie, Chen Liding, Ma Keming, et al. The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of Loess Plateau in Northern Shaanxi, China[J]. Catena, 2000,39(1):69-78.

[7] 韩书成,濮励杰,陈凤,等.长江三角洲典型地区土壤性质对土地利用变化的响应[J].土壤学报,2007,44(4):612-619.

[8] Doran J W, Timmothy B P. Defining and assessing soil quality[M]. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. 1994.

[9] 连纲,郭旭东,王静,等.土壤质量与可持续土地利用管理[J].生态学杂志,2005,24(2):163-169.

[10] 李阳兵,侯建筠,谢德体.中国西南岩溶生态研究进展[J].地理科学,2002,22(3):365-370.

[11] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3):419-427.

[12] 许联芳,王克林,朱捍华,等.桂西北喀斯特移民区土地利用方式对土壤养分的影响[J].应用生态学报,2008,19(5):1013-1018.

[13] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对桂西北喀斯特生态系统土壤有机碳、氮、磷和微生物量剖面分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(3):164-169.

[14] 龙健,黄昌勇,李娟.喀斯特山区不同土地利用方式对土壤质量演变的影响[J].水土保持学报,2002,16(1):76-80.

[15] 龙健,李娟,汪境仁.典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J].水土保持学报,2006,20(2):77-81.

[16] 刘方.喀斯特石漠化过程土壤环境质量变化及生态环境影响评价[J].生态学报,2005,25(3):639-644.

[17] Ellis E C, Wang S M. Sustainable traditional agriculture in the Tai Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment. 1997, 61(2/3): 177-193.

[18] Vitousek P M. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science, 1997,277(5325): 494-499.

[19] Ellis E C, Li Ronggang, Yang Linzhang, et al. Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000:95-104.

[20] 焦加国,武俊喜,李辉信,等.华南丘陵区村级景观下土地利用/土地覆盖对土壤质量的影响[J].土壤学报,2007,44(2):204-211.

[21] 马瑛.北方农牧交错带土地利用生态安全评价[J].干旱区资源与环境,2007,27(1):53-58.

[22] 宋鹏飞,郝占庆.生态资产评估的若干问题探讨[J].应用生态学报,2007,18(10):2367-2373.

[23] 杨珊,何寻阳,苏以荣,等.岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2010,21(6):1596-1602.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net