

基于RS和GIS的松辽平原黑土流失研究

邢宇¹, 姜琦刚¹, 王耿明², 王坤¹

(1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080)

摘要: 基于RS和GIS技术, 利用1986年TM数据和2001年ETM数据, 对松辽平原黑土分布现状与动态变化进行监测研究, 分析了黑土流失特点及其时空分布规律, 并引入冲沟线密度概念量化黑土流失趋势。结果表明: 松辽平原典型黑土面积54 989.92 km², 沿京哈铁路线呈弧形条带状展布; 1986~2001年间, 黑土区水土流失面积达3 765.21 km², 减少速度为251.01 km²/a, 集中在河流两岸、较大建筑用地附近和与盐碱土接壤的地区; 仅考虑冲沟的有效作用域, 预计到2016年黑土面积平均会有1 411.0 km²/a转变为冲沟, 黑土流失状况不容乐观。
关键词: 黑土; 水土流失; 冲沟; 遥感; 地理信息系统; 松辽平原

中图分类号: X87; X833; P208 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)02-0189-06

Study on Black Soil Loss in Songliao Plain Based on RS and GIS

XING Yu¹, JIANG Qi-gang¹, WANG Geng-ming², WANG Kun¹

(1. School of Geospatial Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;

2. Guangdong Institute of Geological Survey, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

Abstract: Based on RS and GIS, current distribution and dynamic changes of black soil were analyzed, the spatial-temporal characteristics of black soil loss were discussed with TM data in 1986 and ETM data in 2001, the gully linear density to quantify the trend of black soil loss was introduced in Songliao Plain. The results show that the area of typical black soil in Songliao Plain is 54 989.92 km², the distribution appears arc-shaped banded along the line of railway from Beijing to Harbin; the area of black soil reduces by 3 765.21 km² from 1986 to 2001 with an average decrease of 251.01 km²/a, and mainly distributes in both sides of river, or near large construction sites, or in the peripheral of saline-alkali soil; if only considering the effective effect of gully, it is estimated that the black soil could transform into gully with a velocity of 1 411.0 km²/a in 2016, and the black soil loss is serious.

Key words: black soil; water loss and soil erosion; gully; RS; GIS; Songliao Plain

0 引言

东北黑土区是世界三大黑土区之一, 其黑土面积虽然不大, 但是土壤肥沃, 适合作物生长, 是中国重要的商品粮生产基地之一, 其粮食生产能力及可持续性关系到国家的粮食安全战略。多年来由于受到自然因素制约和人为活动破坏, 黑土流失情况日趋严重。东北黑土区现有侵蚀沟超过250 000条, 侵蚀耕地超过390 000 hm²。其中, 仅典型黑土区大型侵蚀沟超过60 000条, 占地面积超过40 000 hm², 且多呈发展趋势, 可利用的土地面积连年减少^[1-4]。

因此, 分析黑土分布特征和动态变化规律, 为实现黑土资源利用与保护提供科学依据已势在必行。

黑土的水土流失表现为: ①数量流失, 即黑土垂向土壤厚度减少和面积减少(对于黑土厚度问题, 遥感还难以解决), 松辽平原黑土面积流失的具体表现是黑土地转化为冲沟和建筑用地; ②黑土土壤肥力下降, 即黑土土壤有机质含量降低^[5-7]。一些学者对呼伦贝尔、嫩江、五大连池、克山、北安、海伦等区域的黑土流失分别进行了研究^[8-9], 但是针对近年来整个东北地区的黑土流失研究还较少。笔者针对黑土的面积流失, 对松辽平原全区黑土分

收稿日期: 2009-07-25

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010510613)

作者简介: 邢宇(1982-)女, 山西太原人, 工学博士研究生, 从事RS与GIS应用研究。E-mail: xingyu_xy@eyou.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

布现状与动态变化进行了监测研究, 分析了黑土面积流失特点及其时空分布规律, 定量讨论了黑土面积流失趋势, 为保护与合理开发利用黑土资源以及寻求社会的可持续发展提供决策支持。

1 研究区概况

松辽平原黑土区主要分布在小兴安岭两侧、大兴安岭中北部的东坡以及张广才岭山地西缘的山前坡状起伏的台地(漫岗)。该区年平均气温 0.5~6℃; 年平均降水量 450~650 mm, 季节分布不均, 其中 7~9 月占全年降水量 50% 以上, 冬季雪量少, 季节性冻层普遍。土壤冻结深度达 1.5~2 m, 延续时间长达 120~200 d。自然植被为林间杂类草甸。黑土有机质含量大约是黄土的 10 倍, 是肥力最高、最适宜农耕的土地。东北地区绝大部分商品粮基地分布在松辽平原黑土区内, 近年来每年向国家交售 $(60\sim70)\times10^8$ kg 商品粮, 是极其重要的战略资源。

2 研究方法

2.1 数据获取与处理

2.1.1 数据源

研究区黑土面积流失数据主要来源于 1986 年 TM (14 景) 和 2001 年 ETM (14 景) 遥感数据, 1:50 000 和 1:100 000 地形图, 并结合野外考察和 1:500 000 松辽平原黑土土壤分布图等相关资料, 对黑土解译数据进行修正。

2.1.2 波段合成

考虑到 TM/ETM 波段之间的相关性、不同波段对地物反映敏感性以及确保信息量最大, 同时考虑到波段 1 受大气散射影响较大, 使图像不清晰, 图像合成波段方式选波段 7、4、2 合成。合成后的多光谱图像与全色 8 波段采用小波融合, 生成地面分辨率 15 m 的高分辨率图像。

2.1.3 图像配准

以精校正的 1:100 000 地形图作参考, 对 ETM 遥感影像进行几何精校正, 校正精度误差小于 1 个像素; TM 与 ETM 影像互相校正得到误差在 1 个像元内完全配准的遥感影像。对经过几何校正的遥感图像进行一系列地图投影变换, 并投影到同一坐标系, 即兰伯特等角圆锥投影。

2.1.4 数字镶嵌

采用几何匹配、亮度匹配等一系列技术方法进

行图像数字镶嵌, 以覆盖最大区域的一景为准, 在水平和竖直方向上拼接, 将图像分别镶嵌为完整的遥感影像^[10-12]。

2.2 遥感影像解译与分析

2.2.1 建立解译标志

在遥感图像上, 黑土分布区由于大部分为农田和规则田间道路, 它们共同组成典型格子状。随农田规模大小, 格子大小规模不同; 随季节和植被差异, 遥感图像上颜色有所差别, 不同地区不同时相的黑土表现出不同的色调, 即有酱红色、亮红色、粉红色和(草)绿色调等。黑土区的冲沟都比较发育, 形成较为典型的树枝状水系, 冲沟内植被发育; 黑土区还密集分布有居民地等建筑用地。由于缓坡状和岗状地形, 较为发育的低洼冲沟和微隆起的漫岗, 形成特殊的黑土分布区纹型。根据以上分析、结合野外调查验证, 建立遥感解译标志(表 1)。

表 1 遥感图像的解译标志

Tab. 1 Remote Sensing Images Interpretation Symbols	
土地类型	解译标志
黑土	酱红色、亮红色、粉红色、(草)绿色板块, 边界清晰, 色调呈块状、格子状变化, 内部色调较均匀, 分布在盆地边缘
	黄红色、黄绿色、绿色、暗绿色, 形状宽窄不一, 色调不均, 树枝状弯曲长条状, 纹理粗糙, 在谷地、河流湖泊附近分布
建筑用地	浅粉色、青灰色中夹带青色、白色和橘红色亮点, 折线轮廓明显, 内部色调不均, 形状不规则的斑块

2.2.2 专题信息提取

以 MAPGIS 软件为主要平台, 进行人机交互目视解译, 分别提取黑土、冲沟和建筑用地等信息, 即通过计算机直接进行专题信息的勾绘、修改、属性编辑、统计分析等^[13]。在信息提取过程中, 结合 Photoshop 软件最终完成松辽平原 1986 年和 2001 年 2 个时期的黑土区水土流失信息的遥感解译。

2.2.3 专题信息分析

将以上所得的专题信息按照类型赋予不同的灰度值, 进行图层叠加, 得到最终解译图, 并在此基础上利用空间分析、网格剖分等技术方法和冲沟线密度指数进行黑土流失的综合分析。

3 结果与分析

3.1 黑土带分布现状

松辽平原黑土分布有较为明显的特征。据 2001 年遥感解译(图 1)得知, 典型黑土区北起黑龙

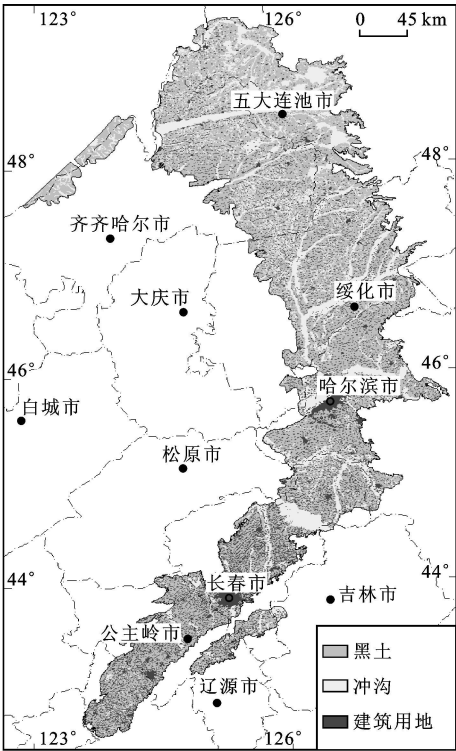


图 1 2001 年典型黑土区分布

Fig. 1 Distribution of Typical Black Soil Zone in 2001

江嫩江,西到黑龙江甘南,东达哈尔滨中部的宾县,南至辽宁昌图。其西界与松嫩平原的黑钙土和盐碱土接壤,东界延伸到小兴安岭和长白山等山间谷地以及三江平原的边缘。黑土带呈弧形条带状分布在哈尔滨至四平、哈尔滨至北安铁路沿线两侧、嫩江中游地区、小兴安岭西侧。

表 2 表明,2001 年松辽平原典型黑土面积为 54 989.92 km²,冲沟面积 24 490.98 km²,建筑用地面积 6 217.92 km²。黑龙江省占全部典型黑土区总面积的 73.03%,吉林省占 22.19%。

3.2 黑土面积流失分析

(1)1986 年黑土分布范围如图 2,15 年间黑土面积减少了 3 765.21 km²,1986 年冲沟和建筑用地面积分别为 21 888.32 km²和 5 055.37 km²,至 2001 年两者分别增加了 2 602.66 km²和 1 162.82 km²。全区黑土面积减少速度为-251.01 km²/a(表 2)。

(2)为了更好地研究黑土面积流失在微观方面的空间动态变化,笔者利用 MAPGIS 对两期数据进行空间判别分析,整理分析结果后得到黑土面积减少分布图(图 3)。黑土流失区域多集中在河流两

表 2 松辽平原黑土流失面积变化

Tab. 2 Change of Black Soil Loss Area in Songliao Plain

地物类型	1986 年		2001 年		2001 年与 1986 年对比	
	面积/ km ²	比例/ %	面积/ km ²	比例/ %	变化面积/ km ²	变化速度/(km ² · a ⁻¹)
黑土	58 755.13	68.56	54 989.92	64.17	-3 765.21	-251.01
冲沟	21 888.32	25.54	24 490.98	28.58	2 602.66	173.51
建筑用地	5 055.37	5.90	6 217.92	7.25	1 162.82	77.52

岸、较大建筑用地附近和与盐碱土接壤的地区。例如黑土带中部绥化市通肯河、克音河、呼兰河的两侧;黑土带南部长春市伊通河两岸、靠山镇附近、朝阳区和宽城区周围等黑土流失情况都比较严重。

黑龙江省黑土流失严重的区域主要分布在黑土带北部齐齐哈尔市的六和镇到同义镇一带、依安县到克山县铁路两侧;黑土带中部绥化市通肯河、克音河、呼兰河的两侧;哈尔滨市平房区北到绥化市北林区一带、沿少陵河经西集镇到松花江一带、宾县、阿城等周围。黑龙江省黑土流失次严重的区域主要分布在科洛河两岸、嫩江县周围、前进镇和长福镇北、四十里河林场到嫩江五分场一带、东方水库南北两侧、五大连池镇周围、由讷河市到龙镇七队的讷谟尔河沿岸、双河镇到新生一带、绥化市与哈尔滨市分界的泥河两岸、松花江南岸的新闻镇

到常安镇和宁远镇一带、安家镇到杜家镇一带等。

吉林省黑土流失严重的区域主要分布在长春市伊通河两岸、靠山镇附近、朝阳区和宽城区周围以及到华家镇一带、伊丹镇经伊通满族自治县和小孤山镇到龙山水库一带。吉林省黑土流失次严重的区域分布在怀家镇、大岭镇和八号镇一带、由榆树市到向阳镇和于家又沿省界到土桥镇一带、达家沟镇附近、由布海镇经纪家镇到赫家窝棚一带。

(3)为了方便从宏观角度分析黑土面积流失规律,笔者将黑土面积动态变化用网格剖分,以离散点的形式表示,运用 MAPGIS 中 DEM 分析的 TIN 模型做等值线追踪分析,按黑土面积减少程度由轻到重划等级(图 4)。在土壤流失研究中前人大多是采用地形坡度和土地利用类型叠加方法进行综合研究,按坡度与植被覆盖度分类^[14],而黑土区地形

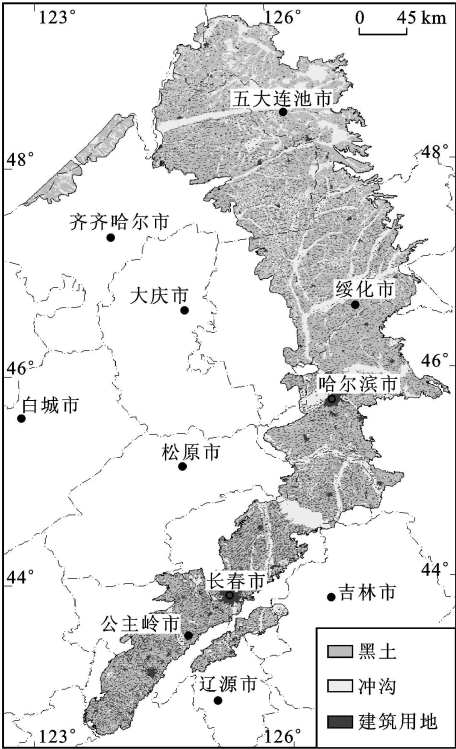


图 2 1986 年典型黑土区分布

Fig. 2 Distribution of Typical Black Soil Zone in 1986

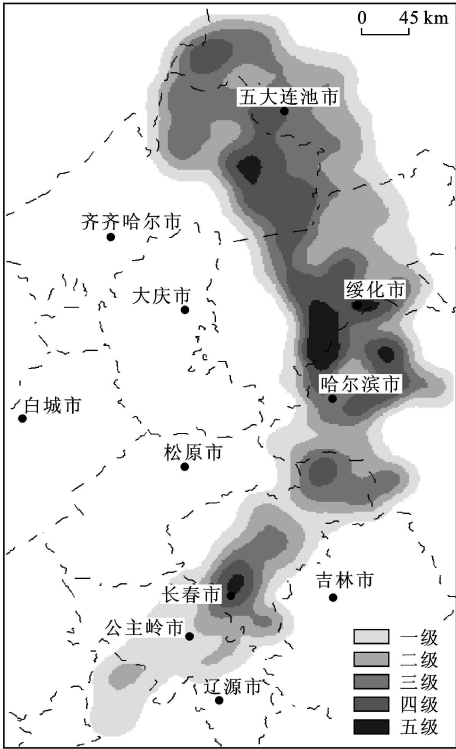


图 4 黑土减少密度分级

Fig. 4 Classification of Black Soil Decrease Density

水土流失通用的分级方法在本区难以适用。因此笔者按单位面积黑土减少量(ΔA)等间距划分黑土面积流失等级为 5 级:一级为 $\Delta A < 4\%$; 二级为 $4\% < \Delta A \leq 8\%$; 三级为 $8\% < \Delta A \leq 12\%$; 四级为 $12\% < \Delta A \leq 16\%$; 五级为 $\Delta A > 16\%$ 。

黑土面积流失整体表现出从黑土带中部的哈尔滨、绥化地区向南北减弱的规律,呈现自黑土带中心向南北减少的趋势。全区黑土流失严重的区域分布在黑土带中部的哈尔滨市和绥化市地区,属于重度(五级)黑土流失;黑土带南北的齐齐哈尔市和长春市次之,属于中度(三、四级)黑土流失;黑河市与四平市的黑土流失情况相对较轻,属于轻度(一、二级)黑土流失。

3.3 趋势分析

松辽平原黑土区降水集中在夏秋季节,且多以暴雨形式出现,加之集雨面积大,故径流集中,冲刷能力大,水蚀严重,春季土壤解冻时,表层土壤疏松,容易被积雪融化的融雪径流冲刷,促进冲沟的蔓延与发展。研究表明,全区面积变化主要集中在黑土和冲沟之间。15 年间冲沟面积增加了 2 602.66 km²,黑土面积减少了 3 765.21 km²,冲沟是黑土流失的重要原因之一,冲沟增加区域往往

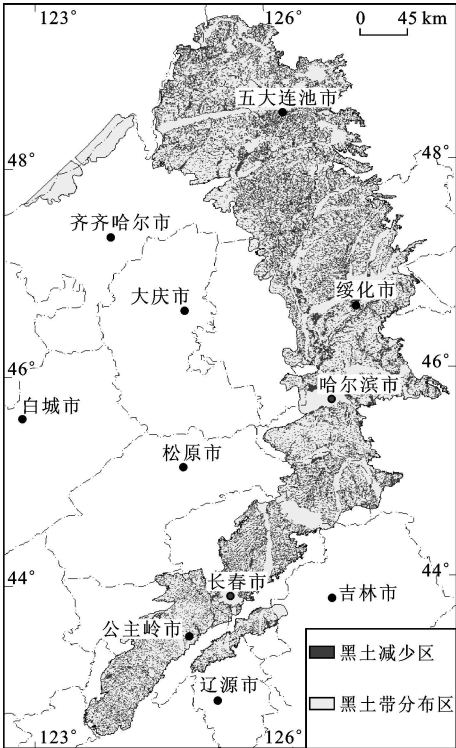


图 3 黑土面积减少分布

Fig. 3 Distribution of Black Soil Area Decrease

是黑土面积减少的区域。但是, 冲沟面积大并不代表其流失量也大, 也不意味其面积变化剧烈。从某种意义上说, 冲沟与黑土的接壤处(冲沟的有效作用域)才存在流失, 将冲沟与黑土相交的边缘交线视为有效流失界线, 量化值定义为有效作用长度。

在水系研究中, 常常利用水系线密度和面密度量化平原区的隐伏构造最新活动和松散堆积平原上的微地貌变迁程度^[15-16], 笔者研究的冲沟与水系有着相似之处, 同时也有自身变化特点, 为了详细反映黑土潜在流失区域和水土流失情况, 借鉴其思路将线密度引入到研究中, 利用线密度来量化冲沟的有效作用强度, 从另一方面反映黑土流失情况。冲沟线密度定义为单位面积内所有冲沟的有效长度总和, 其表达式为

$$D_{\text{Line}} = \frac{\sum L}{A}$$

式中: D_{Line} 为冲沟线密度 (m/m^2); $\sum L$ 为黑土区冲沟与黑土接壤处的有效长度; A 为评价区面积。 D_{Line} 值越大, 表示流失趋势越强。按等间距划分黑土潜在流失能力的等级为 5 级: 一级为 $D_{\text{Line}} < 0.05 \text{ m}/\text{m}^2$; 二级为 $0.05 \text{ m}/\text{m}^2 < D_{\text{Line}} \leq 0.10 \text{ m}/\text{m}^2$; 三级为 $0.10 \text{ m}/\text{m}^2 < D_{\text{Line}} \leq 0.15 \text{ m}/\text{m}^2$; 四级为 $0.15 \text{ m}/\text{m}^2 < D_{\text{Line}} \leq 0.20 \text{ m}/\text{m}^2$; 五级为 $D_{\text{Line}} > 0.20 \text{ m}/\text{m}^2$ 。

历经 15 年, 1986 年冲沟线密度大的区域黑土面积都有较大程度减少。冲沟线密度在一定程度上展现了黑土的潜在流失能力及空间分布状况(图 5)。目前, 黑土区潜在快速流失面积较大。

冲沟线密度变化增大最剧烈的区域讷河市、乌裕尔河克山市附近、海伦县西边界通肯河两岸、呼兰河西县附近、哈尔滨市呼兰区、五常市与榆树市交界处以及长春市附近, 这些地区黑土流失有加剧恶化的趋势。1986 年全区冲沟有效作用长度为 63 135.91 km, 到 2001 年增加了 15 642.63 km。黑土面积有 4 202.67 km^2 转变为冲沟, 计算得到有效冲沟能导致黑土减少量为 0.017 9 $\text{km}^2/(\text{km} \cdot \text{a})$ 。如果不考虑其他因素, 以 2001 年有效冲沟长度来推算, 到 2016 年黑土面积平均会有 1 411.00 km^2/a 转变为冲沟, 黑土流失状况不容乐观。

4 结语

(1) 松辽平原典型黑土面积 54 989.92 km^2 , 主要分布在黑龙江省和吉林省, 少量分布在辽宁

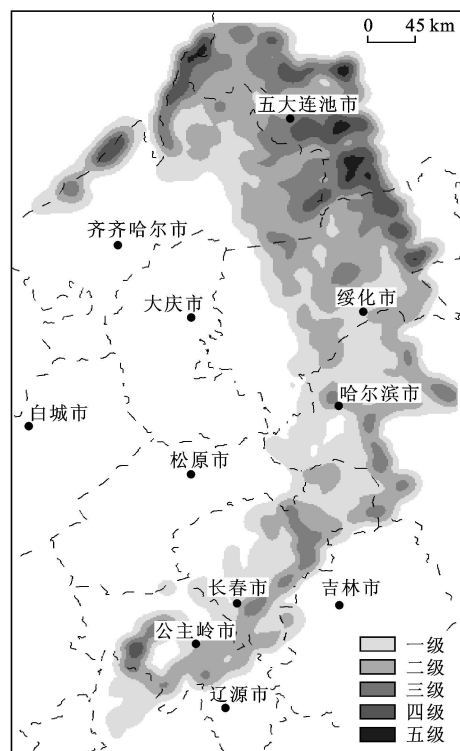


图 5 2001 年冲沟线密度分级

Fig. 5 Classification of Gully Linear Density in 2001

省、内蒙古自治区境内, 从北部的黑龙江黑河到南部的辽宁昌图, 西到黑龙江甘南。其西界与松辽平原的黑钙土和盐碱土接壤, 东界延伸到哈尔滨中部的宾县。

(2) 黑土区水土流失面积为 3 765.21 km^2 , 减少速度为 251.01 km^2/a 。黑土流失集中在河流两岸、较大建筑用地附近、冲沟的有效作用域、黑土与盐碱土接壤的区域, 黑土流失以轻度流失为主, 但中度、重度流失的增长速度较快。黑土流失呈现从黑土带中部的哈尔滨、绥化地区向南北减弱的规律, 并表现出自黑土带中心向南北减少的趋势。

(3) 冲沟增加的区域往往是黑土减少的区域, 黑土减少量与冲沟密度呈正相关, 15 年来冲沟线密度总体增大, 有继续增大的趋势。仅考虑冲沟的有效作用域, 预计到 2016 年黑土面积平均会有 1 411.00 km^2/a 转变为冲沟, 黑土流失形势不容乐观。

(4) 由于本研究基于 ETM 影像分辨率为 15 m, 仅能观测大于 15 m \times 15 m 的黑土流失面积、冲沟和建筑用地的变化面积, 对于黑土与冲沟等地物之间更细微的变化还有待利用更高分辨率的遥感影像进行监测研究。

参考文献:

- [1] 侯雪莹, 韩晓增, 王树起, 等. 不同土地利用和管理方式对黑土肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 99-103.
- [2] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 50-54.
- [3] 于磊, 张柏. 中国黑土退化现状与防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 99-103.
- [4] 张晓平, 梁爱珍, 申艳, 等. 东北黑土水土流失特点[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 687-692.
- [5] 程水英, 李团胜. 土地退化的研究进展[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(3): 38-43.
- [6] 罗明, 龙花楼. 土地退化研究综述[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 287-293.
- [7] 张桃林, 王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报, 2000, 15(3): 280-284.
- [8] 崔文华, 辛亚军, 于彩嫻. 呼伦贝尔市大兴安岭东麓黑土区土壤侵蚀研究[J]. 土壤, 2005, 37(4): 439-446.
- [9] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24.
- [10] 蔡博峰, 路瑞锁. 基于 RS 和 GIS 的公路生态影响研究[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(5): 54-58.
- [11] 马明国, 管频, 李志强, 等. 基于遥感与 GIS 的甘肃省公路工程困难指数计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 45-50.
- [12] 景奉广, 梁明, 霍宏, 等. 遥感分类图在高精度栅格矢量转换中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(1): 86-90.
- [13] 张继承, 姜瑞刚, 李远华, 等. 基于 RS/GIS 的西藏地区湖泊变化动态监测及气候背景[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 87-93.
- [14] 何丙辉. 重庆市三峡库区土壤侵蚀分级分类标准的探讨[J]. 水土保持研究, 2003, 17(4): 63-65.
- [15] 王若柏, 郭良迁, 韩慕康, 等. 河北平原水系密度与隐伏活动构造的关系[J]. 地理学报, 2002, 57(3): 284-292.
- [16] 侯建军, 韩慕康. 渭河盆地全新世隐伏构造活动[J]. 地理学报, 1994, 49(3): 258-265.
- (上接第 182 页)
- [31] Ono S H, Wing B, Rumble D, et al. High Precision Analysis of All Four Stable Isotopes of Sulfur(^{32}S , ^{33}S , ^{34}S and ^{36}S) at Nanomole Levels Using a Laser Fluorination Isotope-ratio-monitoring Gas Chromatography-mass Spectrometry [J]. Chemical Geology, 2006, 225(1/2): 30-39.
- [32] 地质矿产部矿床地质研究所同位素地质研究室. 稳定同位素分析方法研究进展[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992.
- [33] Puchelt H, Sabels B R, Hoering T C. Preparation of Sulfur Hexafluoride for Isotope Geochemical Analysis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1971, 35(6): 625-628.
- [34] Thode H G, Rees C E. Measurement of Sulphur Concentrations and the Isotope Ratios $^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ and $^{36}\text{S}/^{32}\text{S}$ in Apollo 12 Samples[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 12(4): 434-438.
- [35] Rees C E. Sulphur Isotope Measurements Using SO_2 and SF_6 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1978, 42(4): 383-389.
- [36] Savarino J, Alexander B, Damohusodo V, et al. Sulfur and Oxygen Isotope Analysis of Sulfate at Micromole Levels Using a Pyrolysis Technique in a Continuous Flow System[J]. Analytical Chemistry, 2001, 73(18): 4457-4462.
- [37] Grassineau N V, Matthey D P, Lowry D. Sulfur Isotope Analysis of Sulfide and Sulfate Minerals by Continuous Flow-isotope Ratio Mass Spectrometry[J]. Analytical Chemistry, 2001, 73(2): 220-225.
- [38] Ohmoto H, Kakegawa T, Lowe D R. 3.4-billion-year-old Biogenic Pyrites from Barberton, South Africa: Sulfur Isotope Evidence[J]. Science, 1993, 262: 555-557.
- [39] Ohmoto H. Archaean Atmosphere, Hydrosphere and Biosphere[C] // Eriksson P G, Altermann W, Nelson D R et al. The Precambrian Earth: Tempos and Events. Amsterdam: Elsevier, 2004: 361-388.
- [40] Huston D L, Logan G A. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydrosphere[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220(1/2): 41-55.
- [41] Kakegawa T, Ohmoto H. Sulfur Isotope Evidence for the Origin of 3.4 to 3.1 Ga Pyrite at the Princeton Gold Mine, Barberton Greenstone Belt, South Africa[J]. Precambrian Research, 1999, 96(3): 209-224.
- [42] 侯可军, 李延河, 万德芳. 鞍山—本溪地区条带状硅铁建造的硫同位素非质量分馏对太古代大气氧水平和硫循环的制约[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(8): 997-1003.
- [43] Pavlov A A, Mills M J, Toon O B. Mystery of the Volcanic Mass-independent Sulfur Isotope Fractionation Signature in the Antarctic Ice Core[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L12816/1-L12816/4.
- [44] Savarino J, Bekki S, Cole-Dai J, et al. Evidence from Sulfate Mass Independent Oxygen Isotopic Compositions of Dramatic Changes in Atmospheric Oxidation Following Massive Volcanic Eruptions[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D21): 4671-4676.