

基于 ALOS 和 PPS 的退耕还林工程监测

——以沽源县九连城镇为例

高莉, 全锋, 申磊, 邓华锋, 彭道黎

(北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以 ALOS 数据作为卫星遥感数据信息源, 利用计算机进行监督分类和人机交互式解译, 可提取工程区实际退耕还林面积, 但对所有图斑进行实地植被状况调查的费用是非常昂贵和费时的。采用不等概抽样方法(PPS), 将给定的遥感解译图斑面积/各工程实施图斑面积作为辅助因子, 根据 30 块工程实际面积和 GPS 实地量测退耕还林面积, 估计工程保存造林总面积, 将两者提取面积做了对比分析。分析结果表明, 该方法分析精度达到 86.2%, 对及时掌握工程实施进度及质量, 也具有极其重要的意义。

关键词: 遥感解译; 不等概抽样; 估测精度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)06-0022-05

中图分类号: F124.5 TP79

Monitoring Method in Returning Cropland to Forestland Project Based on ALOS and PPS

—Taking Jiuliancheng Town in Guyuan County as an Example

GAO Li, QUAN Feng, SHEN Lei, DENG Hua-feng, PENG Dao-li

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: By taking ALOS as remote sensing information source and using supervised classification and human-computer interactive interpretation, the actual area of returning cropland to forestland project is extracted. Since complete measurement for the whole area is expensive and time-consuming, the map-spot area in remote sensing interpretation is selected as auxiliary sampling factor by using sampling methods of probability proportional to size (PPS). The total area of the project is estimated according to the areas of 30 engineering projects and the areas measured by GPS. The areas extracted from GPS and RS are then compared and the precision is up to 86.2%. This study is of importance in controlling the progress of project and its quality.

Keywords: RS interpretation; sampling methods of probability proportional to size(PPS); estimate precision

坝上地区属我国北方农牧交错带中典型的生态环境脆弱地区, 气候的干旱加剧了土地沙漠化。为改善当地的生态环境, 根治京津地区的沙尘暴天气, 退耕还林(还草)工程是改善生态环境的迫切需要。2002年, 杨存建等^[1]利用 TM 和 AVHRR 影像在全国范围内进行退耕还林还草分析, 探讨了利用遥感 RS 数据结合現地调查确定需要退耕还林还草耕地的数量及其空间分布。2008年, 保家有等^[2]通过光谱混合分析技术进行亚像元尺度上荒漠化信息提取, 构建了荒漠化评价的沙地植被指数, 区分不同程度的荒漠化土地。上述研究为今后进一步的论证奠定了必要的基础。但对所有的林地完成调查是非常昂贵和

费时的, 上述研究的不足之处可能在于: 首先常用的植被指数如植被归一化指数等, 难以区分生长状况较好的草地与低盖度的灌木林地; 其次野外核查中, 简单采用随机抽样的方法进行检查, 缺乏对分类结果的精度验证。

抽样调查是森林资源综合监测调查的关键技术和方法。遥感技术可缩短森林资源清查的周期, 快速、准确、高效地获取森林资源的各种数据, 评价森林资源的质量与效益, 实现森林资源的定期甚至是实时监测^[3], 解决了传统的信息采集和处理方式很难满足要求, 但是花费了大量的人力物力仍难获取所需信息的困境^[4]。地面抽样技术是“3S”技术地面核查的必

收稿日期: 2010-05-31

修回日期: 2010-06-07

资助项目: “十一五”国家科技支撑计划课题“国家重点林业工程监测技术研究”(2006BAD23B05)

作者简介: 高莉(1987—), 女(汉族), 山东省枣庄市人, 硕士研究生, 从事林业 3S 技术研究。E-mail: li_li045@126.com。

通信作者: 邓华锋(1966—), 男(汉族), 湖南省涟源市人, 博士, 副教授, 主要从事森林可持续经营研究。E-mail: denghuafeng@bjfu.edu.cn。

要手段。不等概抽样在样本组织、资料分析及对总体参数的估计方面, 都比等概抽样复杂^[5]。但在一定条件下, 采用不等概抽样方法要比等概抽样得到较高的估计效率。即在保证同样的抽样精度与可靠性条件下, 多采用不等概抽样(PPS, sampling with probability proportional to size)估计方法^[12]。本研究以沽源县九连城镇为例, 采用基于遥感监测和地面抽样调查相结合的方法, 对退耕还林工程实施情况进行“双量”符合性监测。一方面, 利用高分辨率遥感影像, 采用人机结合的方式对退耕还林地块进行全覆盖识别和监测, 另一方面, 结合遥感影像分类结果进行不等概抽样地面调查, 获得总体估计值, 进而对是否接受遥感监测结果进行判定。该方法既能对工程实施情况作出总体评价, 又能反映具体地块的完成情况, 从而高效地对退耕还林工程实施进度及质量进行监测。

1 研究区概况及研究资料

1.1 研究区概况

沽源县地处河北坝上高原, 位于河北省最北部, 在内蒙古高原东南边缘, 是阻挡风沙入侵北京的最后—道屏障。地理坐标为 $114^{\circ}50'38''-116^{\circ}04'09''E$, $41^{\circ}14'33''-41^{\circ}56'55''N$ 。全县总面积 $3\ 654\ km^2$, 辖 17 个乡(1 个镇), 231 个行政村, 753 个自然村。年平均气温 $1.4\ ^{\circ}C$, 年降水量 $450\ mm$, 年平均大风日数 66 d, 大部分属温带半干旱草原地带, 是河北省沙漠化最严重、最难治理的地区之一^[6]。

九连城镇位于沽源县城西 $59\ km$ 处, 东与沽源县黄盖淖镇分界, 西与康保县接壤, 南与张北县毗邻, 北与内蒙古自治区包场县为邻。全镇共辖 30 个行政村, 76 个自然村。全镇土地总面积为 $322\ km^2$, 耕地总面积 $7\ 396\ hm^2$ 。自 2000 年实施京津风沙源退耕还林工程以来, 根据《2000—2006 年沽源县退耕还林工程验收统计表》, 到 2006 年共完成工程 $6\ 277.6\ hm^2$, 其中退耕还林 $3\ 277.2\ hm^2$, 荒山匹配 $3\ 000.4\ hm^2$ 。九连城镇退耕还林树种主要为沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、枸杞(*Lycium chinense*)、榆树(*Ulmus pumila*)及少量的山杏(*Armeniaca sibirica*)。

1.2 资料获取

本研究的基础资料有 1 : 10 万沽源县地形图, 2009 年 6 月 1 日 ALOS 10 m 分辨率遥感数据。2002—2006 退耕还林数据。退耕还林工程图是退耕还林保存情况检查的重要资料。以 ALOS 遥感卫星

数据作为信息源, ALOS 卫星(advanced land observing satellite), 是日本宇航研究开发机构于 2006 年 1 月发射的一颗陆地观测卫星。数据来自 ALOS 先进可见光和近红外辐射计(AVNIR-2), 产品级别为 Level1B1, 经过辐射校正, 增加了绝对定标系数。主要用于陆地观测, 为区域环境监测提供土地覆盖图和土地利用分类图, 获取时间为 2009 年 6 月 1 日。具有 $10\ m$ 的空间分辨率, $0.42\sim0.69\ \mu m$ 可见光谱段波谱分辨率以及 $0.76\sim0.89\ \mu m$ 近红外波段波谱分辨率。

ALOS 的 4 个波段数据具有较丰富的图像层次, 而且图像的纹理特征清晰, 反映地物类别空间特征的差异特性明显。ALOS 数据 4, 3, 2 波段组合的假彩色图像, 能够扩大地物间的差异, 提高地物解译的准确性, 较好地反映植被覆盖状况。ALOS 数据的平面点位精度、影像分类精度及样地面积精度均能达到要求, 尤其在小样地上, 面积精度较高^[7]。

2 研究方法

2.1 遥感图像预处理

Franz Rottensteiner 发现 AVNIR-2 采用 GPS 获取控制点进行校正, 虽然可以达到像素级精度, 但仍不及采用地形图控制点的正射校正方式^[8]。本研究中, 使用 ERDAS IMAGINE 软件的几何校正模块(geometric correction), 采用地形图获取控制点进行正射校正的方法, 选用 Polynomial(多项式变化, 同时做投影变换), 多项式的次数选为 2 次, 采集地面控制点数为 40 个。控制点的选取遵循图像上易分辨且较精细的特征点, 如道路交叉点、城廓边缘等; 特征变化大的地区应多选点; 图像边缘部分一定要选取控制点, 以避免外推^[9]。通过 Compute Error 计算检查点误差, 当所有检查点的误差和小于 1 个像元(pixel)时, 进行重采样。根据 ALOS 数据的特点及重采样后具有较好的光谱信息和目视解译效果, 选择双线性插值方法^[10]。通过 Geo Link/Unlink, 建立地形图与遥感图像的连接, 检验校正结果。

2.2 退耕还林工程图斑判读及信息提取

沽源县九连城镇干旱少雨多风沙, 因此, 适宜乔木生长的范围是有限的, 而当地许多灌木树种对干旱环境有较强的适应性, 适宜造林的范围广。在防风固沙, 水土保持, 改善生态环境方面有突出作用, 此外, 灌木林还可以提供饲料, 燃料, 有较高的开发利用价值^[11]。在京津风沙源退耕还林工程中使用的树苗为

沙棘、柠条、枸杞等灌木树种,为了提高成活率,树苗高度为 10—20 cm。由于干旱的气候条件,大部分变成了“小老树”。退耕还林工程营造的灌木林除自然条件稍好、领导重视的地方以及经济价值较高的灌木林质量较好外,其他灌木林从总体上看质量较差^[12]。同时未成林造林地在 ALOS 10 m 分辨率影像上与草地、灌木林地混合像元严重。利用亚像元分解法获得高精度的退耕还林面积是不现实的^[13]。根据沽源县林业局提供的 2002—2006 年退耕还林工程,九连城退耕还林地块个数共计 317 个(附图 1)。将收集的退耕还林数据与遥感数据叠加,经过内业人机交互式目视解译与外业核实,计算遥感判读面积。对各图斑进行实地植被状况调查,对所有地块完成踏查是非常昂贵和费时的。同时由于各工程面积大小不一,可以运用不等概抽样方法对遥感监测面积进行检验。本研究以工程图斑面积作为辅助变量确定抽样单元,一般可保证各图斑被抽中的概率与各图斑的面积成比例。

2.3 GPS 实地测量

在 GPS 测量过程中,便携式 GPS 接收机锁定卫星数一般在 9 颗以上。GPS 为卫星定位系统,其测量精度易受到各种外界因素影响,出现误差属于正常现象。一般来说,大面积测量相对精度高,小面积测量有一定误差,所以多采用多组测量求平均值的方式。行走过程中,每遇到拐弯处,可多停留一段时间,待坐标位置显示末位数停止变动后,确定点位,然后继续行走,直到回到出发点。如测量一正方形,在沿途的 3 个直角处可设 3 个点,最后回到起点,即可得测量结果^[14]。

2009 年 9 月,根据不等概抽样方法(PPS)抽取的 30 个样地,对九连城镇进行实地调查。野外调查中主要用 GPS 获取抽样地的经纬度坐标,边界拾取,测量样地面积,记录主要土地利用类型、植被类型、植被盖度、地形地貌、植被分布特征、植被生长状况等信息,并实地拍摄照片辅助解译,为内业数据处理提供详实的资料。利用 eTrex vista 型 GPS 进行航迹法计算面积。

2.4 利用不等概抽样方法估计工程有效总面积

2.4.1 抽样方法 不等概抽样,在一定情况下可大幅度改进和提高估计结果的精度。结合 ALOS 数据分辨能力,以遥感解译面积作为辅助变量确定抽样单元,实测抽中样地面积。根据遥感解译面积,一般可保证

多样地被抽中的概率与多样地的面积成比例^[16]。京津风沙源治理工程监测质量评定中规定,当合格率小于 85%时,评定为不合格,要重新进行调查^[15]。

2.4.2 PPS 抽样估计及精度计算方法 重复抽样的 PPS 估计量,其抽样方差表达式比不重复抽样的表达式简化,采用重复抽样方法。

(1) 设总体 N 单位的目标变量值即工程实施每块的面积为 x_1, x_2, \dots, x_N ; 辅助变量即遥感解译面积为 y^1, y^2, \dots, y^N ; 各单位被抽中的概率为 p_i , X 为工程实施总面积, $p_i = \frac{x_i}{X}$; 即各单位被抽中的概率之和

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1.$$

$$(2) R_i = \frac{\text{遥感解译第 } i \text{ 地块的面积}}{\text{工程实施第 } i \text{ 地块的面积}}, \text{ 即 } R_i = \frac{y_i}{x_i},$$

式中: R_i —— 面积保存率。

(3) $\bar{y}_p = \frac{X}{N} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i}$, 式中: \bar{y}_p —— 是总体平均数的估计值; N —— 总体样本数; n —— 样本单元数。

$$(4) S^2(\bar{y}_p) = \bar{X}^2 \frac{1}{n(n-1)} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i}{x_i} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{x_i} \right)^2 \right] \text{ 式中: } S^2(\bar{y}_p) \text{ —— 估计值的方差;}$$

(5) $\Delta(\bar{y}_p) = tS(\bar{y}_p)$, 式中: $\Delta(\bar{y}_p)$ —— 估计值; t —— 可靠性指标;

(6) $E(\bar{y}_p) = \frac{\Delta(\bar{y}_p)}{y_p}$, 式中: $E(\bar{y}_p)$ —— 估计误差限;

(7) $P_c = 1 - E(\bar{y}_p)$, 式中: P —— 估计精度;

(8) $y_{pps}^{\wedge} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{p_i}$, 式中: y_{pps}^{\wedge} —— 实际有效造林

面积;

2.4.3 图斑 PPS 抽样统计 (1) 遥感解译面积和历年工程实施面积。将退耕还林工程图与遥感数据叠加, ALOS 数据采用 4, 3, 2 波段组合, 利用遥感提取合格退耕面积。本研究中采用二项取舍法抽取样本 30 个。经过对沽源县九连城镇 30 块样地的实际面积进行调查(表 1)。(2) 精度检验。九连城镇共有工程样地 317 个, 工程总面积 $S = 6\,277 \text{ hm}^2$ 。即 $N = 317$, $X = \sum_{i=1}^N x_i = 6\,277.6 \text{ hm}^2$, $\bar{X} = 38.02 \text{ hm}^2$, $\sum_{i=1}^N R_i = 20.6$, $R = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{n} = \frac{20.6}{30} = 0.69$, $\sum_{i=1}^N R_i^2 = 16.02$ 。以 95% 的可靠性指出其估计误差限和精度, 即 $\Delta(\bar{y}_p) = t_{0.05} S(\bar{y}_p)$, 抽样统计结果见表 2。

表 1 PPS 抽样样本调查数据

| 编号 | 遥感解译 面积 y_i / hm^2 | 工程实施 面积 x_i / hm^2 | 保存率 R_i | 编号 | 遥感解译 面积 y_i / hm^2 | 工程实施 面积 x_i / hm^2 | 保存率 R_i |
|----|--------------------------------|--------------------------------|-----------|--------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| 1 | 2.83 | 6.60 | 0.43 | 16 | 20.00 | 20.20 | 1.00 |
| 2 | 22.00 | 65.70 | 0.33 | 17 | 37.10 | 37.10 | 1.00 |
| 3 | 37.30 | 59.40 | 0.63 | 18 | 40.80 | 46.90 | 0.87 |
| 4 | 36.90 | 89.10 | 0.41 | 19 | 24.10 | 30.60 | 0.79 |
| 5 | 4.30 | 5.10 | 0.86 | 20 | 36.00 | 41.20 | 0.87 |
| 6 | 31.56 | 35.60 | 0.89 | 21 | 11.80 | 18.00 | 0.66 |
| 7 | 51.80 | 63.20 | 0.82 | 22 | 27.00 | 43.90 | 0.62 |
| 8 | 22.70 | 27.70 | 0.82 | 23 | 0.80 | 6.20 | 0.13 |
| 9 | 49.60 | 64.80 | 0.77 | 24 | 35.00 | 42.50 | 0.82 |
| 10 | 41.50 | 42.50 | 0.98 | 25 | 4.40 | 6.80 | 0.64 |
| 11 | 13.30 | 93.70 | 0.14 | 26 | 4.80 | 8.20 | 0.58 |
| 12 | 8.40 | 55.00 | 0.15 | 27 | 23.80 | 33.40 | 0.71 |
| 13 | 25.00 | 48.40 | 0.52 | 28 | 0.76 | 1.10 | 0.67 |
| 14 | 36.00 | 44.80 | 0.80 | 29 | 17.40 | 17.40 | 1.00 |
| 15 | 51.00 | 63.40 | 0.80 | 30 | 19.60 | 22.00 | 0.89 |
| 合计 | | | | 737.60 | 1140.50 | 20.60 | |

表 2 PPS 抽样统计结果

| 指标名称 | 指标值 |
|--|----------|
| 30 个样地平均有效面积 \bar{y}_p / hm^2 | 26.10 |
| 估计图斑合格面积方差 $S^2(\bar{y}_p)$ | 3.10 |
| 抽样标准误 $S(\bar{y}_p)$ | 3.68 |
| 抽样精度 $p_e / \%$ | 85.90 |
| 工程总面积 $\hat{y}_{pps} / \text{hm}^2$ | 4 331.50 |

3 结果与分析

(1) 九连城镇退耕还林工程监测结果统计如表 3 所示。

(2) 经过调查, 造成实际 PPS 调查地块面积比遥感监测面积减小的主要原因有 3 个: ① 部分工程图斑中包括历史上其它工程的面积 (如三北防护林工程); ② 对灌木林种而不管, 粗放经营, 部分工程图斑护栏被破坏, 植被受到牲畜的啃食, 严重地区导致植被死亡或者被重新开垦, 种植裸燕麦 (*Avena sativa*) 和油用亚麻 (*Linum usitatissimum*) 等农作物, 对灌木林的重要性和经济价值认识不足, 认为灌木林效益不高价值不大, 存在重乔轻灌的思想; ③ 近来连续多年的干旱致使部分已成活的植株死亡, 灌木及间种的牧草生长状况不良, 密度较大的灌木林甚至出现衰败和死亡现象, 灌木林防火和病虫鼠兔害防治形势也很严峻。此外, 遥感影像判读的误差主要是部分混合像元的信息划归到图斑面积之内。将 GPS 测量多边形与 ALOS 数据叠加, 对照实地调查数据, 发现将少量土壤条件较好, 靠近农田, 水分条件较好, 植被盖度高的荒地误判为工程有效面积, 但总体面积不大, 图斑个

数 1 块。每块工程图斑都是各种因素综合作用的结果, 在抽样调查的 30 块图斑中, 其中包含三北防护林的图斑为 15 块, 由于放牧和重新开垦为耕地的图斑数为 25 块, 由于近年持续的干旱导致植被死亡的图斑个数为 23 块。

表 3 九连城镇退耕还林工程监测结果

| 工程总面积 / hm^2 | 遥感解译面积 / hm^2 | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | 三北防护林 面积 / hm^2 | 退耕还林 失败面积 / hm^2 | PPS 实测估计 面积 / hm^2 |
| 6 277.6 | 37.2 | 658 | 4 331.5 |

注: 遥感解译精度 = PPS 实测估计面积 / 遥感解译总面积 = 86.2%。

4 结论

(1) 采用 ALOS 10 m 分辨率遥感影像, 通过与地面不等概抽样调查技术相结合, 提高了遥感估算面积的准确性。一定样本容量下的有效造林面积的估计精度, 不仅反映了抽样精度, 也反映了工程的实施状况。本研究确定样本数为 30 个, 以各图斑面积作为辅助因子, 采用各图斑遥感解译面积比上工程实施面积, 所得到的结果是无偏的, 其平均数无需再加权。

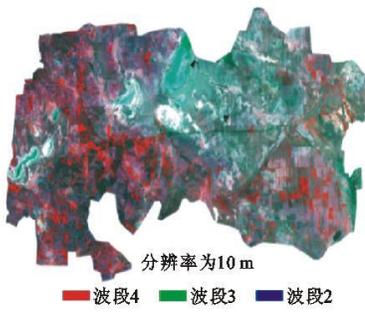
(2) 以图斑面积作为辅助因子, 提高了总体面积估计的精确性。应根据调查目标总体特征、针对实际调查对象的需要, 研究相应的抽样调查方法, 并建立抽样体系。当监测项目要求核查多个子项目时, 例如蓄积量, 有多个辅助因子, 实际上是有多个不同的总体, 这些不同总体内部的方差、总体单元的变动系数

都不一样,应采用多阶不等概抽样。

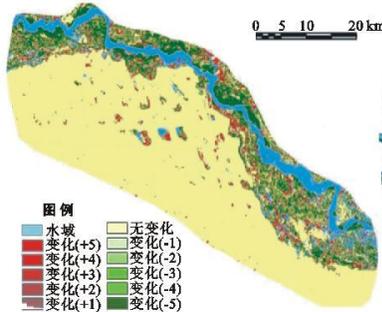
(3) 在干旱、半干旱的华北地区和西北地区,退耕还林工程中营造的灌木林占 36.36%,但是总体质量差^[12]。要充分认识到大力发展灌木林是干旱半干旱地区增加森林覆盖率、改善生态环境、增加农民收入的重要途径,避免重乔轻灌。在灌木林培育与利用上,遵循林业生态建设的自然规律和经济规律,坚持以生态效益为主、兼顾经济效益和社会效益的原则,推动退耕还林取得更好的效果。

[参 考 文 献]

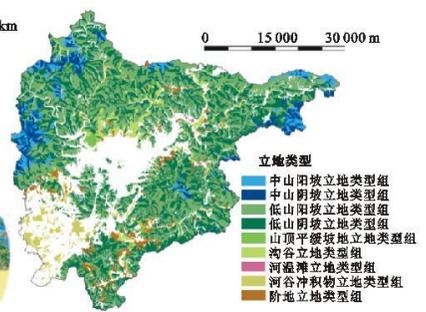
- [1] 杨存建,刘纪远,张增祥,等.遥感和 GIS 支持下的中国退耕还林还草决策分析[J].遥感学报 2002, 6(5): 207-210.
- [2] 保家有,李晓松,吴波.基于沙地植被指数的荒漠化评价方法[J].东北林业大学学报, 2008, 36(1): 69-72.
- [3] 黎颖卿,黄宁辉.浅谈遥感在我国森林资源监测中的应用现状[J].防护林科技, 2006(7): 61-64.
- [4] 张会儒,张鸿文.建设我国退耕还林工程信息管理和监测系统的可行方案[J].林业科技管理, 2002(2): 28-31.
- [5] 史京京,雷渊才,赵天忠.森林资源抽样调查技术方法研究进展[J].林业科学研究, 2009, 22(1): 101-108.
- [6] 刘京会,刘巧芹,丁疆辉.河北省坝上地区沙化背景分析及景观生态对策:以沽源县为例[J].国土资源科技管理, 2003(5): 58-61.
- [7] 何宇华,谢俊奇,刘顺喜.ALOS 卫星遥感数据影像特征分析及应用精度评价[J].地理与地理信息科学 2008, 24(2): 23-26.
- [8] Franz R, Thomas W, Adam L et al. A strip adjustment approach for precise georeferencing of ALOS optical imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2009, 12: 4083-4091.
- [9] 党安荣,王晓栋,陈晓峰.ERDAS IMAGINE 遥感图像处理方法[M].北京:清华大学出版社, 2003: 1-101.
- [10] 尹业彪,李霞,石瑞花.基于 ALOS 数据 3 种插值方法对比分析[J].新疆农业大学学报, 2008, 31(6): 46-49.
- [11] 赵明范.论灌木林在“三北”防护林建设中的作用[J].中国沙漠, 1993(3): 53-57.
- [12] 张鸿文,杜纪山,汪飞跃,等.退耕还林工程灌木林培育与利用探讨[J].林业经济, 2008(11): 26-30.
- [13] 顾祝军,曾志远.遥感植被盖度研究[J].水土保持研究, 2005, 12(2): 18-21.
- [14] 刘弘,姚连芳,马杰.GM-101 型 GPS 面积测量与精度评价[J].河南科技学院学报, 2008, 36(3): 33-35.
- [15] 国家林业局.京津风沙源治理工程及工程区沙化土地监测技术规程(试行)[S].国家林业局公报, 2002.
- [16] 宋新民,李金良.抽样调查技术[M].北京:中国林业出版社, 2007: 186-197.
- (上接第 21 页)
- [11] Zhao L, Chen G C, Cheng G D, et al. Permafrost: status, variation and impacts[M] //Zheng D, Zhang Q S, Shao H. Mountain Geocology and Sustainable Development of the Tibetan Plateau. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000: 113-137.
- [12] Wu Q B, Zhu Y L, Liu Y Z. Evaluation model of permafrost thermal stability and thawing sensibility under human activity[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34: 19, 30.
- [13] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface process, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.
- [14] 王根绪,刘桂民,常娟.流域尺度生态水文研究评述[J].生态学报, 2005, 25(4): 892-903.
- [15] 周幼吾,郭东信,丘国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社, 2000.
- [16] Zhang Y S, Ohata T, Kang E, et al. Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in eastern Asia[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 1135-1147.
- [17] 李元寿,王根绪,沈永平,等.长江源区不同植被覆盖下产流产沙效应初步研究[J].冰川冻土, 2005, 27(6): 869-875.
- [18] 宋克超,康尔泗,金博文,等.两种小型蒸散仪在黑河流域山区植被带的应用研究[J].冰川冻土, 2004, 26(5): 617-623.
- [19] Song G, Yan H T. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 129(3/4): 175-185.
- [20] 李太兵,王根绪,胡宏昌,等.长江源多年冻土区典型小流域水文过程特征研究[J].冰川冻土, 2009, 31(1): 82-88.
- [21] 李林,张过胜,汪青春,等.黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究[J].地球科学进展, 2000, 15(3): 256-259.
- [22] Rodriguez I. Ecohydrology: A hydrological perspective of climate-soil-vegetation dynamics[J]. Water Resour. Res., 2000, 36(1): 3-9.



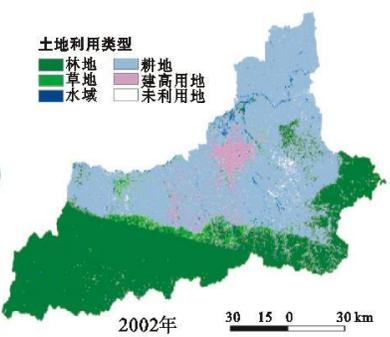
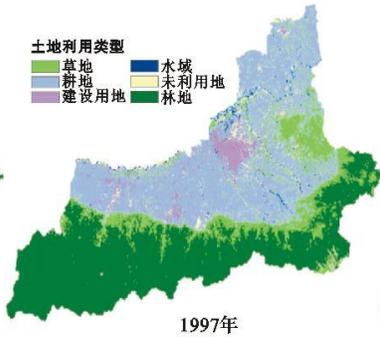
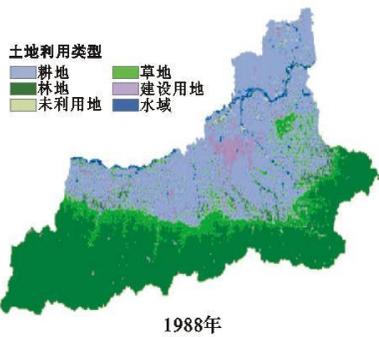
附图1 九连城2002—2006年退耕区分布



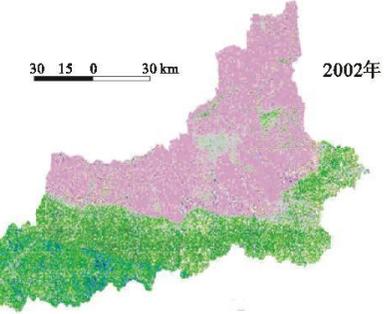
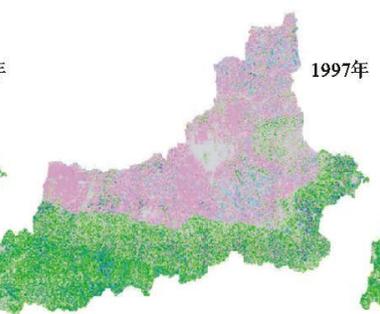
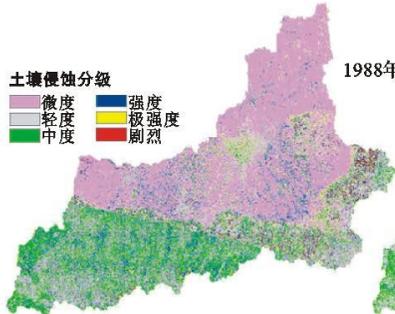
附图2 库布齐沙漠荒漠化等级变化图



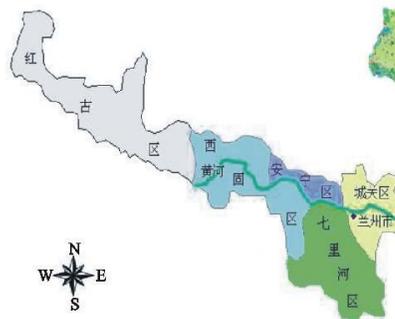
附图3 密云县水源涵养林立地类型分类图



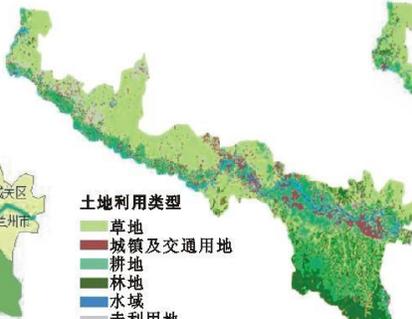
附图4 西安市1988, 1997, 2002年土地利用类型图



附图5 西安市1988, 1997, 2002年土壤侵蚀分布图



附图6 兰州市区划图



附图7 兰州市2002年土地利用图



附图8 兰州市2006年土地利用图