

基于影像分析的黄土丘陵沟壑区土壤水分采样研究

王晓军, 武江涛, 王兵, 温奋翔

(山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘要: [目的] 以山西省寿阳县三眼井小流域土壤水分采样为例, 对采样点进行了均匀性和代表性分析, 以此验证土壤采样设计的合理性。[方法] 利用统计分析 SPSS 13.0 软件和 ArcGIS 软件, 以规则网格采样点作为初步布设图, 然后结合遥感影像, 把自动生成的规则网格采样点在兼顾土地利用类型和可操作性的前提下进行微调, 即采用大均匀小随机布点法进行土壤采样点布设。[结果] 最近邻点指数和变异系数均显示采样点分布较均匀; 从采样点的坡度代表性来看, 由于大均匀小随机采样考虑到实际可操作性, 采样点布设多集中在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$, 坡度的代表性较差; 从采样点的坡向代表性来看, 采样点代表性较好; 从土地利用类型代表性来看, 大均匀小随机法得到的采样点对草地与耕地的代表性较好, 对林地的代表性较差, 主要因为林地多分布在陡坡上难以采样。[结论] 总体来看, 大均匀小随机采样法得到的样点均匀性和代表性都比较好, 且由于黄土丘陵沟壑区沟壑纵横, 地形复杂, 利用此方法可以兼顾均匀性、代表性和可操作性。

关键词: GIS; 大均匀小随机布点; 规则网格布点; 均匀性; 代表性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0181-06

中图分类号: S159.3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.034

A Study on Image-based Soil Moisture Sampling Method in Hilly and Gully Area of Loess Plateau

WANG Xiaojun, WU Jiangtao, WANG Bing, WEN Fenxiang

(The College of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: [Objective] To test the rationality of soil sampling design, we took Sanyanjing basin of Shouyang county in Shanxi Province as a case study, to analyze the uniformity and representativeness of soil water sampling. [Methods] Using statistics analysis software and ArcGIS, we took grid sampling points as the initial layout. And then combined with remote sensing images, the automatic generated regular grid sampling points were finely adjusted giving the consideration of land use types and operation, namely, using uniform sampling in large scale and random sampling in small scale method for soil sampling point layout. [Results] Both of the nearest neighbor index and coefficient of variation showed a uniform distribution of sampling points. Sampling points obtained by uniform sampling in large scale and random sampling in small scale method were mainly concentrated in the slope of $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$, which is not representative according to the distribution of slope. While the selected sampling points were representative according to the distribution of aspect. The points obtained by uniform sampling in large scale and random sampling in small scale method were more representative in grassland and farmland, but fewer representatives in forest land, due to the woodland is mainly distributed on steep slope and difficult to sample. [Conclusion] The uniformity and representativeness of sampling points obtained by large uniform small sample random sampling method are quite good. This sampling method can be well applied in hilly and gully area of the Loess Plateau to obtain uniform and representative sampling points.

Keywords: GIS; uniform sampling in large scale and random sampling in small scale; grid sampling; uniformity; representativeness

收稿日期: 2014-02-27

修回日期: 2014-03-26

资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目“黄土高原荒溪近自然治理的土壤—植被水文生态作用研究”(41201277); 山西省科技重大专项“晋北沙化土地防治的关键技术研究及试验示范”(20121101011); 山西省自然科学基金项目“黄土残垣沟壑区小流域土壤水分空间异质性研究”(2014011034-2)

第一作者: 王晓军(1968—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 副教授, 主要从事自然资源评价与管理研究。E-mail: xjwang@sxu.edu.cn。

通信作者: 王兵(1979—), 女(汉族), 河北省邢台市人, 博士, 讲师, 主要从事农田生态系统水氮利用方面的研究。E-mail: wang_bing1996@163.com。

土壤水分作为植物生存的一个基本因子,在水土流失严重的黄土高原丘陵沟壑区却是制约黄土高原植被建设的关键限制因子,因此土壤水分的研究一直是黄土高原水土资源合理利用和生态恢复的主要内容^[1-2]。要了解研究区真实的土壤水分状况,依赖于所获得的土壤水分数据的可靠性和有效性,因此要求采样点尽可能多,但是过多的采样不仅费时费力,其时效性也受到影响,而采样点过少,则可能丢失重要的土壤性质空间信息。因此,建立科学的土壤采样布点模式,对于降低土壤采样成本、提高预测制图质量、客观真实地反映研究区现状等具有重要的意义^[3-6],特别是针对黄土高原地区小流域这种复杂的地形条件,如何合理制定采样方案显得尤为重要。

目前国内外常用的土壤采样布点方法主要有主观判断采样(judgmental sampling)、简单随机采样(simple random sampling)、规则网格采样(grid sampling)、分区采样(stratified sampling)以及混合采样(composite sampling)等^[7-8]。而在土壤采样模式中,Wang 等^[9]认为主要有简单随机采样模式、规则网格采样模式。简单随机采样虽然保证每个被抽取的样本概率相同,且相互独立,保证了抽取的无偏差性,但缺点之一是常出现样本不均匀成堆分布的情况,以及在相同花费下采样方差比其他采样模式大。而规则网格采样则可确保样点能覆盖到整个区域,能更好的获取整体信息。但是网格法比较适用于某个坡面或某种单一的土地利用方式下环境因素相对均一、简单的土壤空间异质性的研究,可以较好地反映研究区土壤性质的空间相关性^[10-13]。因此,如果土壤采样点同时结合这两种布点方法,在规则网格布点的基础上兼顾采样实际可操作性对采样点进行调整,即大均匀小随机方法,则可更加合理地布置采样点。目前,考虑到黄土高原丘陵沟壑区地形破碎,景观高度异质性,土壤采样多根据不同的土地利用方式、地形状况以及典型坡面法来布设样点^[14-15],相比较而言,利用规则网格和随机布点相结合的土壤采样在黄土丘陵沟壑区的研究中并不多见。

本研究在遥感影像的基础上,利用统计分析方法和 GIS 空间分析技术,在土壤样品采集前初步对大均匀小随机样点分布的均匀性和代表性进行分析,以验证此次土壤采样设计的合理性,为黄土高原丘陵沟壑区更合理地进行土壤采样提供方法和依据。

1 研究区域概况

本文研究区域位于山西省寿阳县的三眼井流域(113°1'43"—113°2'43"E,37°45'45"—37°45'53"N),流

域长约 2 km,宽约 1 km,面积约 2 km²;主沟道长约 2 km,宽约 30 m,主沟方向为北南向,北低南高,次级沟谷多呈东西向分布。该区主要为山区与平原区的转折部分,地表黄土覆盖,第四系的马兰黄土和离石黄土广泛发育,是典型的黄土丘陵区,主要由梁和深度切沟组成,海拔在 996~1 160 m。该地区年均气温 7.3℃,年均降雨量为 581.3 mm,降水主要集中在 7—9 月,全年蒸发量介于 1 800~2 000 mm。该区的土地利用类型以旱作梯田为主,玉米为主要的种植作物,耕作方式以牲畜耕作为主。植被主要有松树、杨树、刺槐以及蒿类、禾本科草类等灌木和草本植物。

2 材料与方法

2.1 采样点的布设

采用高清晰正射影像和实测 1:2 000 地形图,利用渔网工具生成 150 m×150 m 规则网格,以自动生成的规则网格采样点为初步布设图,结合遥感影像,兼顾实际可操作性,对规则网格中心样点进行适当的调整,尽量使调整后的样点在其原来对应的网格内,相对均匀的布设 101 个采样点,其中在水井周围布设 3 个采样点,打印并塑封采样点图,便于在野外实际采样过程中及时调整。

本文的土壤剖面水分样品采集于 2013 年春季,采用传统土钻法钻取 0—300 cm 剖面土壤,测定土壤水分。在采样过程中,首先观察草图的采样点是否适宜采样,然后在采样的同时记录《采样点调查表》和《寿阳三眼井流域土壤水分测定表》。如果草图中的采样点难以实行,例如位于极陡的坡上等情况,则在附近重新选取采样点。通过室内布设的采样点草图和实际采样点图比较,有 8 个采样点进行了重新调整,采样点共计 101 个。实际采样点分布情况如图 1 所示。

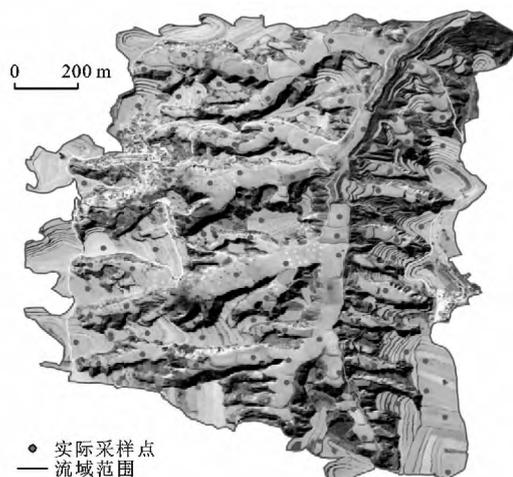


图 1 土壤剖面水分样品实际采样点分布

2.2 数据处理与分析方法

数据的处理与分析采用 Excel 制作表格, SPSS 13.0 进行经典统计分析, 运用 GIS 的空间分析技术提取采样点的土地利用类型与地形信息。

2.2.1 采样点均匀性分析方法 一方面将采用大均匀小随机法、规则网格法和集中布点法 3 种方法得到采样点分布, 以规则网格为单元统计每个网格中的采样点个数, 计算出平均值、标准差和变异系数, 通过变异系数来分析此次采样点空间分布的均匀性; 另一方面还用平均最近距离工具^[16]对采样点分布均匀性进行分析。

2.2.2 采样点代表性分析方法 利用 ArcGIS 软件结合实地调查绘制土地利用图, 根据实测 1:2 000 地形图生成 DEM 数字高程模型, 并利用空间分析方法绘制坡度和坡向图, 将大均匀小随机法和规则网格法得到的采样点分布图与土地利用图、坡度图、坡向图叠加提取相关信息^[17], 对采样点的分布状况与流域中各种土地利用类型、坡度类型、坡向类型分布状况进行比较分析其代表性。

本文采用黄河水利委员会绥德水保试验站在黄土丘陵沟壑区非园沟多年试验结果制定的临界坡度分级系统, 按照 3°, 8°, 15°, 25°, 35°及 45°的临界坡度值将流域内的坡度分成 7 个等级^[18-19]。坡向分为平坦、东、西、南、北、东北、东南、西南和西北 9 个等级。

3 结果与分析

3.1 采样点分布均匀性分析

李梅等^[7]在 GIS 支持下豫东地区土壤野外采样布点方法探索中采用规则网格法, 同时采用表层采样与剖面采样相结合、网格点与类型控制点相结合的方法, 最后得出采样密度为每 4 km² 一个点, 通过公式 $n = Z^2 p(1-p)/d^2$ 验证采样点间距的合理性, 结果显示采样点间距可行, 均匀性比较好。同时通过与通许县土壤图做叠置分析表明, 采样点基本涵盖了所有的土种类型, 代表性好。李玲等^[5]以郑州市土壤肥力监测为例, 通过统计不同区域和不同土壤类型的采样点数量, 分析了采样点的均匀性和代表性, 其采样方法也是以规则网格法为基础, 在布点中参考土壤图和土地利用规划图及第二次土壤普查时的主剖面及农化样点位置(尽可能的落在同一田块中), 同时兼顾土壤类型面积大小上的差异, 结果表明, 采样点的均匀性和代表性较好。

表 1 是不同采样布点方式下得出的相应参数, 结合附图 1—2 可以看出, 实际采样点数在每个网格单元中多为 1 个。实际采样点数量的标准偏差、变异系

数分别为 0.69 和 0.95, 规则网格法得到的采样点数量的标准偏差、变异系数分别为 8.54 和 11.75。从 3 种方法布设的采样点数量分布的变异系数来看, 基于遥感影像的大均匀小随机采样方法获得的采样点分布比较均匀, 十分接近于规则网格法。

第二种方法采用平均最近距离工具分析测量样点均匀性。该方法采用最近邻点指数即测量距离与预期距离的比例(预期距离是由同样数目的同类要素在同样区域假定为随机分布得来)分析采样点的均匀性, 最近邻点指数见公式(1):

$$R = \bar{D}_{\text{Obs}} / \{1 / (2 \sqrt{N/A})\} \quad (1)$$

式中: R ——最近点指数; \bar{D}_{Obs} ——各点与其最近邻点之间距离的平均值(平均最近邻距离); N ——总点数; A ——给定区域的面积。 $R \leq 0.5$ ——密集分布; $0.5 < R < 1.5$ ——随机分布; $R \geq 1.5$ ——均匀分布。如果平均距离小于假定为随机分布的距离, 那么此要素分布被认为是趋向聚集的, 如果平均距离大于假定为随机分布距离, 那么此要素的分布被认为是趋向分散的。

表 1 不同采样布点方式下的统计信息

网格单元 (行/列)	实际采样点 数量/个	规则网格中心 点数量/个	集中布点 数量/个
1/1	0	1	101
1/2	0	1	0
1/3	0	1	0
1/4	0	1	0
1/5	0	1	0
...
...
...
15/7	2	1	0
15/8	1	1	0
15/9	0	1	0
15/10	0	1	0
15/11	0	1	0
16/8	0	1	0
16/9	1	1	0
16/10	0	1	0
16/11	1	1	0
平均值	0.73	1	0.73
标准偏差	0.69	0	8.54
变差系数 C_v	0.95	0	11.75

本文研究区域的总点数为 101, 面积为 1.39 km², 根据最近邻点指数分析结果显示最近邻距离值为 106 m, 带入公式(1), 得到最近点指数值为 1.9, 说明

研究区采样点为均匀分布。

综上所述可以看出,利用变异系数和最近邻近指数法得到的结果是一致的,基于遥感影像的大均匀小随机方法得到的采样点分布均匀。

3.2 采样点代表性分析

由于土地利用方式、坡度、坡向、高程等对土壤各种性状的空间分布有重要的影响,因此本文通过坡度、坡向、土地利用方式对以遥感影像为基础的大均匀小随机采样方法获得的采样点进行了研究。

3.2.1 采样点在不同地形条件的分布情况

(1) 采样点在不同坡度范围的分布情况。根据测绘得到 1:2 000 的地形图生成 DEM 数字高程模型,在此基础上按照 3°,8°,15°,25°,35°与 45°的临界坡度分级系统重分类后得到了研究区坡度图,统计不同坡度范围的面积;将坡度图与规则网格布点、实际采样布点进行叠加分析(附图 1—2),提取采样点的坡度信息,得出采样点在各坡度范围分布的统计特征(表 2),如果采样点的个数比例与相应的坡度范围面

积比例越接近,则说明采样点代表性越好。从表 2 可以看出,研究区按坡度从低到高的顺序,不同范围面积比例依次为 10%,22%,17%,14%,12%,11%和 14%,坡度主要集中在 3°~15°之间,无坡地最少。

规则网格法采样点在不同坡度范围内分布的比例依次为 12%,26%,18%,11%,12%,9%和 12%,由此可以看出,规则网格布点法与研究区不同坡度范围的面积比例基本相符,代表性很好,但是由于规则中心网格布点落在 45°~90°的点有 16 个,如果某些地方坡度过陡,不便于采样,为了兼顾实际采样方案的可操作性,对规则网格布点进行了适当的调整后得出大均匀小随机采样方案,通过分析得出采样点在不同坡度范围内分布的比例依次为 21%,43%,21%,6%,4%,2%以及 3%,与研究区不同坡度范围的面积比例相比,采样点在 <15°内分布的比例大于研究区面积比例,在 >15°内的分布情况则相反,所以对坡度而言虽然此次采样方案的可操作性好,但是其代表性较差。

表 2 基于 DEM 导出的坡度信息统计量

坡度等级	坡度/(°)	面积/m ²	面积比例/%	实际采样点数量/个	实际采样点数量比例/%	规则网格采样点数量/个	规格网格采样点比例/%
1	0~3	143 193	10	21	21	17	12
2	3~8	304 632	22	44	43	36	26
3	8~15	235 713	17	21	21	25	18
4	15~25	192 311	14	6	6	15	11
5	25~35	171 135	12	4	4	17	12
6	35~45	146 014	11	2	2	12	9
7	45~90	193 865	14	3	3	16	12

(2) 采样点在不同坡向范围的分布情况。根据测绘得到 1:2 000 的地形图生成 DEM 数字高程模型,在此基础上,按坡向分类标准得到了研究区坡向分布图,将坡向图与规则网格采样点分布图、实际采样点分布图进行叠加(附图 3—4),得出研究区域各类坡向的统计特征值(表 3)。如果采样点的个数比例与相应的坡向范围面积比例越接近,则说明采样点代表性越好。从表 3 可以看出,研究区坡向等级 1—10 所占面积比例依次为 4%,8%,16%,18%,13%,8%,6%,9%,11%和 7%,大均匀小随机采样点在不同坡向范围内的比例依次为 8%,4%,27%,21%,5%,4%,1%,11%,12%和 7%,规则网格采样点在不同坡向范围内的比例依次为 2%,6%,17%,17%,17%,6%,1%,16%,12%和 6%,可以看出,规则中心网格布点与该坡向范围面积所占比例基本相似,但结合坡度图(附图 1—2)可以看出,坡向在 112°~157°之间,规则网格法采样点的坡度都在 45°以上,在实际

采样中难以实现。因此,基于所占比例,综合实际情况和数据的有效性分析,说明大均匀小随机采样点代表性比较好。

3.2.2 采样点在不同土地利用方式的分布情况 将土地利用图与规则网格采样点图、实际采样点图进行叠加,得到不同土地利用类型分布图(附图 5—6),面积比例以及采样点在不同土地利用类型中的分布比例,分析结果见表 4。如果采样点的个数比例与相应的土地利用类型面积比例越接近,则说明采样点代表性越好。从表 4 可以看出,研究区域的土地利用类型主要有耕地、林地、草地、果园以及居民宅基地,所占面积比例依次为 51%,36%,9%,1%和 3%,研究区域的土地利用类型以耕地和林地(主要是灌木林地)为主。此外,从表 2 可以看出,规则网格采样点分布在耕地、林地、草地、果园和居民宅基地的比例依次为 53%,33%,11%,1%和 2%,大均匀小随机采样点个数落在耕地、林地、草地的比例分布依次为 77%,

15%和 8%,与土地利用类型面积比例相比,规则网格的个数比例更接近土地利用类型面积比例,但是, ArcGIS 自动生成的规则网格采样点不一定是符合要求的有效点。例如有 3 个点落到建筑区域,由于城镇、住宅、道路、沟渠、坟墓附近等处人为干扰大,失去土壤的代表性,同时由于黄土高原地形破碎,还有部分采样点落在沟谷陡坡上,在实际采样过程中难于操作,有一定的局限性。而与研究区中不同土地利用类型面积比例相比,本文采用的大均匀小随机采样法得

到的采样点在草地中的分布比例更为接近,耕地中的较多而林地较少。通过对土地利用图与坡度图做叠加分析,得到基于坡度分级的土地利用图(附图 7),从表 5 和附图 7 可以看出,林地主要分布在大于 25°的陡坡上,比例为 67%,其中在坡度为 45°~90°之间分布最多,比例达到 27%。耕地主要分布在 0°~15°之间,比例为 76%。以上结果看出林地在大于 45°的坡上分布较多,采样比较困难,因此,导致实际采样点在林地中分布的比例较小。

表 3 基于 DEM 导出的坡向信息统计量

坡向等级	坡向/(°)	面积/m ²	面积比例/%	实际采样点数量/个	实际采样点比例/%	规则网格采样点数/个	规则网格采样点比例/%
1	-1	56 338	4	8	8	3	2
2	0~22.5	106 437	8	4	4	8	6
3	22.5~67.5	220 257	16	27	27	23	17
4	67.5~112.5	246 141	18	21	21	23	17
5	112.5~157.5	183 367	13	5	5	23	17
6	157.5~202.5	112 421	8	4	4	9	6
7	202.5~247.5	81 484	6	1	1	2	1
8	247.5~292.5	128 073	9	11	11	22	16
9	292.5~337.5	156 008	11	13	12	17	12
10	337.5~360.0	96 337	7	7	7	8	6

表 4 各类土地利用类型的信息统计量

土地类型	面积/m ²	面积比例/%	实际采样点数量/个	实际采样点比例/%	规则网格采样点数量/个	规则网格采样点比例/%
耕地	709 021	51	78	77	74	53
林地	503 125	36	15	15	45	33
草地	118 034	9	8	8	15	11
园地	15 697	1	0	0	1	1
建筑	40 984	3	0	0	3	2

表 5 基于坡度分级的土地利用类型的面积及所占面积比例

坡度等级	林地面积/m ²	林地面积比例/%	耕地面积/m ²	耕地面积比例/%
1	10 062	2	127 624	18
2	35 219	7	248 156	35
3	45 281	9	163 075	23
4	75 469	15	92 173	13
5	100 625	20	35 451	5
6	100 625	20	21 271	3
7	135 844	27	21 271	3

4 结论

(1) 本研究区域采样点数量分布的均匀性分析表明,以遥感影像为基础,采用大均匀小随机的布点方式,采样点分布的变异系数接近于规则网格布点,

表明此次布点比较均匀,最近邻点指数也说明此次大均匀小随机布点比较均匀。

(2) 从大均匀小随机采样点的代表性分析可知,整体来看,通过对规则网格中心法获得的采样点在不同地形和土地利用类型中分布的比例更接近相应的坡度范围、坡向范围、土地利用的面积比例的原因分析出大均匀小随机布点兼顾实际可操作性,并且大均匀小随机采样主要分布在 0°~25°缓坡和缓陡坡的耕地和林地上,坡向范围主要集中在 22°~67°和 67°~112°,所占比例基本与其面积比例一致,说明此次大均匀小随机布点代表性比较好。

综上所述,结果表明利用随机布点与规则网格布点相结合的大均匀小随机的方法进行土壤采样布点优化在黄土高原丘陵沟壑区区域具有较好的适用性,如果在此基础上,考虑到土地利用、坡度、坡向的分布情

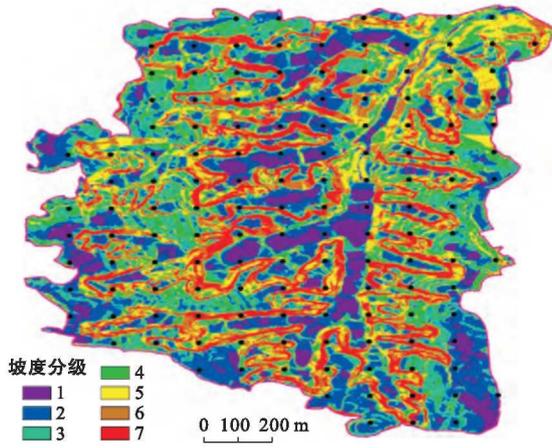
况,可以更精确得进行土壤采样布点。同时还表明小流域或区域中土壤采样均匀性与代表性需要运用 ArcGIS 的空间分析方法,把数字地形分析的结果以及土地利用现状图运用到大均匀小随机采样布点上,使土壤剖面研究从采样点布设到分析的每一个环节都变得更为便捷,并且在样点布置的合理性、取样的科学性和数据分析结果的准确可靠性等方面都得到了显著的提升。因此,利用大均匀小随机的方法,结合土地利用、坡度、坡向的特点进行采样布点,可以满足均匀性和代表性的要求,又能减少样品采集过程中的误差,避免造成资金和人力上的浪费。

[参 考 文 献]

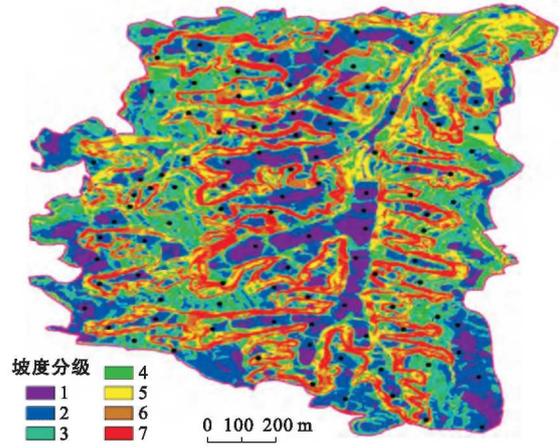
- [1] 王栓全,岳宏昌,王伟. 黄土丘陵沟壑区不同土地类型的土壤水分特性[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):93-96.
- [2] 邝高明,朱清科,刘中奇,等. 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(3):74-77.
- [3] 陈天恩,董静,陈立平,等. 县域农田土壤采样布局多目标优化分析模型[J]. 农业工程学报,2012,28(23):67-73.
- [4] 苏晓燕,赵永存,杨浩,等. 不同采样点数量下土壤有机质含量空间预测方法对比[J]. 地学前缘,2012,18(6):34-40.
- [5] 李玲,陈伟强,江辉,等. 3S 在土壤布点与采样中的应用[J]. 中国农学通报,2007,23(6):388-391.
- [6] 李翔,潘瑜春,赵春江,等. 利用不同方法估测土壤有机质及其对采样数的敏感性分析[J]. 地理科学,2007,27(5):689-694.
- [7] 李梅,张学雷,武继承. GIS 支持下豫东地区土壤野外采样布点方法探索[J]. 土壤,2011,43(3):459-465.
- [8] Peigné J, Vian J F, Cannavacciolo M, et al. Soil sampling based on field spatial variability of soil microbial indicators[J]. European Journal of Soil Biology, 2009(45):488-495.
- [9] Englund E, Weber D, Leviant N. The effects of sampling design parameters on block selection[J]. Mathematical Geology, 1992,24(3):329-343.
- [10] 苏晓燕. 采样设计对土壤有机质含量空间预测精度的影响研究[D]. 南京:南京师范大学,2012.
- [11] 申祥民,雷晓云,陈大春,等. 不同布点方式的膜下滴灌棉田土壤水分的空间变异研究[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(4):363-368.
- [12] 姚丽贤,周修冲,蔡永发,等. 不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及其推估精度研究[J]. 土壤,2004,36(5):538-542.
- [13] Visschers R, Finke P A, De Gruijter J J. A soil sampling program for the Netherlands [J]. Geoderma, 2007,139(1):60-72.
- [14] 史志华,朱华德,陈佳,等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2012,23(4):889-895.
- [15] 白天路,杨勤科,申佳. 黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布变异特征及影响因子[J]. 生态杂志,2009,28(12):2508-2514.
- [16] 闫健康. GIS 支持的平原地区乡(镇)域村庄布点规划研究[D]. 郑州:河南大学,2007.
- [17] 刘瑞民,杨志峰,沈珍瑶,等. 基于 DEM 的长江上游土地利用分析[J]. 地理科学进展,2006,25(1):102-108.
- [18] 汤国安,宋佳. 基于 DEM 坡度制图图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):157-160.
- [19] 赵牡丹,汤国安. 黄土丘陵沟壑区不同坡度分级系统及地面坡谱对比[J]. 水土保持通报,2002,22(4):33-36.

(上接第 180 页)

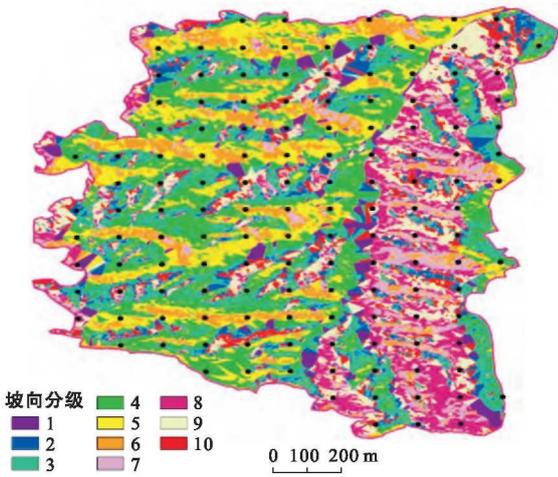
- [6] 王生俊,贾学民,韩文峰,等. 高速公路下伏采空区剩余沉降量 FLAC3D 计算方法[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3545-3550.
- [7] 高速公路采空区(空洞)勘察设计与施工治理手册[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [8] Satty T L. How to make a decision; The analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990,48(1):9-26.
- [8] 王念秦,罗东海. 滑坡发育阶段判定的改进可拓层次分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,19(4):27-32.
- [9] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,24(7):93-100.
- [10] 常建娥,蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2007,29(1):153-156.
- [11] 李世勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:99-101.



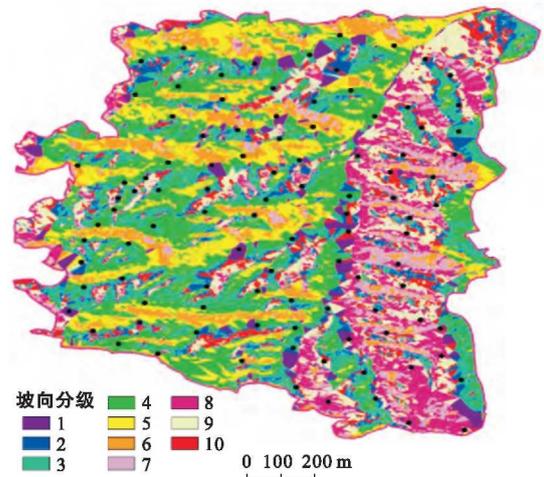
附图1 三眼井流域坡度与规则网格采样点叠加图(184页)



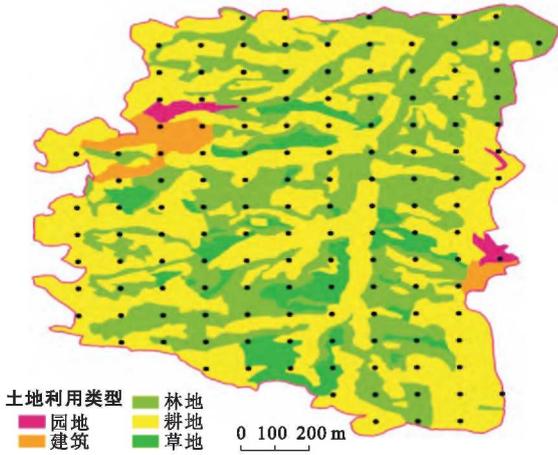
附图2 三眼井流域坡度与实际采样点叠加图(184页)



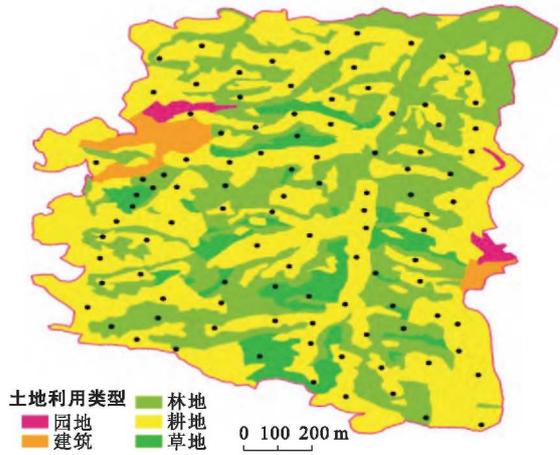
附图3 三眼井流域坡向与规则网格采样点叠加图(184页)



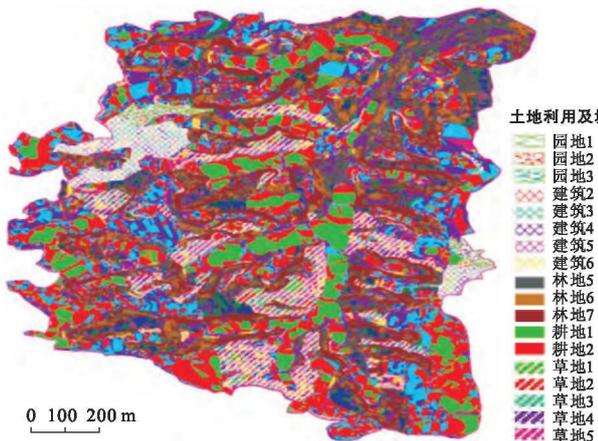
附图4 三眼井流域坡向与实际采样点叠加图(184页)



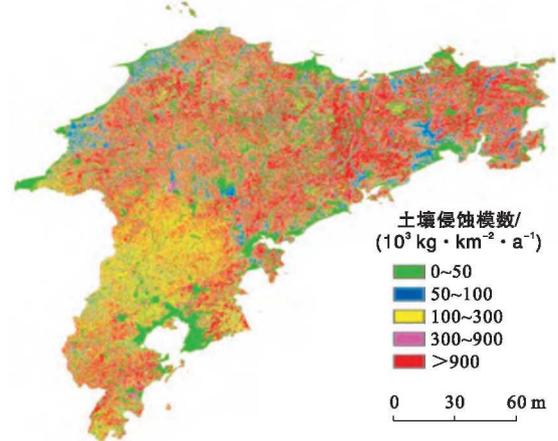
附图5 三眼井流域土地利用与规则网格采样点叠加图(184页)



附图6 三眼井流域土地利用与实际采样点叠加图(184页)



附图7 三眼井流域基于坡度分级的土地利用类型图(185页)



附图8 1998—2010年胶东半岛土壤侵蚀量均值空间分布(190页)