

呼伦贝尔道路对草地土壤表层颗粒组成空间变异的影响

雷军^{1,2}, 孙禹¹, 元志辉², 哈斯·额尔敦¹

(1. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875; 2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: [目的] 揭示呼伦贝尔草地不同道路影响下路边土壤表层颗粒组成的空间变异特征, 为道路沿线水土流失治理提供科学依据。[方法] 对省道 S203 和土路的坡顶、坡底、轮坑以及 0—30 m 样带和 30—210 m 样带进行实地采样, 经风干处理后用吸管法测定了颗粒组成, 采用 ArcGIS 10.0 软件进行的克里金插值和半方差分析。[结果] 省道 S203, 路边土壤粉粒和石砾含量空间变异较大, 变异系数分别为 95.96% 和 80.05%。道路边坡附近粉粒和黏粒含量少, 随着与路边距离的增加, 粉粒和黏粒含量增加; 而土路对路边土壤黏粒含量的影响较大, 车轮碾压轮坑附近黏粒含量多; 道路和沿线人类活动对石砾和粉粒含量的影响强至中等。[结论] 受人类活动影响, 研究区道路沿线土壤表层不同颗粒组成空间分布发生变化, 而黏粒含量形成了沿着道路呈带状分布的空间分布特征。

关键词: 呼伦贝尔草地; 路边土壤; 颗粒组成; 半方差分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0018-04

中图分类号: S157.1

文献参数: 雷军, 孙禹, 元志辉, 等. 呼伦贝尔道路对草地土壤表层颗粒组成空间变异的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 18-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.004

Influences of Roads on Spatial Variance of Top Soil Particle Size Distribution of Hulunbeier Grassland

LEI Jun^{1,2}, SUN Yu¹, YUAN Zhihui², HASI · Erdun¹

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China)

Abstract: [Objective] Studying the influences of different roads on spatial variance of top soils particle size distribution of Hulunbeier grassland to provide basis for soil erosion control. [Methods] Roadside top soil (1—10 cm) samples were collected at the top and bottom of road bank, the wheel rolling pit, the 0—30 m belts, and the 30—210 m belts from provincial road S203 and unsurfaced road. The soil samples were air dried and then the particle size distribution was measured by pipette method. All data were analyzed by GIS based techniques including Kriging interpolation and semivariance analysis. [Results] There was a significant spatial variance for silt and gravel in the provincial road S203; the coefficients of variation were 95.96% and 80.05%, respectively. Near the road bank, the soils' contents of silt and clay were smaller than other sampling sites, but gravel contents were larger than others. The larger of distance between sampling sites and road, the greater of contents of silt and clay. The soil contents of clay and silt near the wheel rolling pits were larger than other sampling sites for the unsurfaced road. The influences of roads on the contents of silt and gravel in roadside top soil were between strongly to moderately. [Conclusion] Affected by human activities, the particle size distribution patterns of top soils in studying area were reformed, and the contents of clay showed a zonal distribution patterns along the roadsides.

Keywords: Hulunbeier grassland; particle size; roadside top-soils; semivariance analysis

收稿日期: 2015-03-31

修回日期: 2015-05-06

资助项目: “十二五”科技支撑课题“荒漠化地区退化土地治理与植被保育技术集成与示范”(2012BAD16B0202); 国家自然科学基金项目(41061042)

第一作者: 雷军(1966—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士研究生, 研究方向为干旱区道路生态环境影响。E-mail: leijun@imnu.edu.cn.

通信作者: 哈斯·额尔敦(1964—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区科左中旗人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区地貌与环境方面的研究。E-mail: Hasi@bnu.edu.cn.

道路作为人类活动强烈的区域,道路沿线土壤退化问题日益受到学者们的关注^[1-2]。然而,道路的各种生态环境影响在时间上滞后,因此长期以来被人们忽视。公路通过铺设路基改变沿线土壤颗粒组成,并通过边坡侵蚀以及对沿线土壤植被的踩踏和车轮碾压等使路边土壤颗粒组成发生变化,而道路对土壤物理属性的影响主要集中在道路两侧 0~50 m 内^[1-4];公路改变微地形要素,导致沿线水力和风力作用发生改变,使地表物质的侵蚀、搬运、堆积过程和土壤颗粒组成发生变化;土路等未铺设路基的道路产生道路尘土,胡霞等^[5]研究车轮碾压对草地土壤物理属性的影响后认为,土路因车轮碾压等改变土壤紧实度和抗蚀能力。Vollmer 等^[9-10]于 1976 年研究沙地土路理化性质变化后发现,土路对沙地灌丛植被的生长有很大影响^[6]。土壤颗粒组成变化影响土壤孔隙度、水分和养分动态^[7-8],最终影响植物生长;土壤颗粒组成同样影响重金属等污染物的积累与净化过程^[11]。因此道路对路边土壤表层颗粒组成的影响研究具有重要意义。道路干扰下动物移动格局(movement pattern)发生变化^[12],而草地土壤是人和牲畜踩踏最频繁的地区。经人畜踩踏,路边土壤紧实度和土壤抗蚀能力发生变化。国内道路生态环境问题的研究处于探索阶段,系统性实验研究成果鲜见报道^[13]。本研究通过呼伦贝尔草地土路和省级道路 S203 沿线土壤颗粒组成进行实地采样和实验测定,用 ArcGIS 10.0 生成的克里金插值图来表征其空间变异特征,用半方差分析方法判断道路与沿线人活动对土壤表层颗粒组成的影响。其目的是解释不同道路影响下路边土壤表层颗粒组成的空间变异特征和影响因素,为道路沿线水土保持和路边土壤污染防治提供科学依据。

1 研究区概况

内蒙古呼伦贝尔高原分布着大面积砂质草地,土路和公路的修建破坏了沿线砂质土壤表层结构和草地植被,因此引起土壤侵蚀和土壤颗粒组成变化。野外采样区选择了地形平坦、自然环境条件均一的呼伦贝尔市海拉尔区以西 12 km 处(49°14'47"—49°14'55"N, 119°39'55"—119°40'5"E)的土路和新巴尔虎左旗阿木古楞镇以南 8 km(48°10'31"—48°10'40"N, 118°17'45"—118°17'57"E)的省道 S203。其中,省道 S203 因铺设路基形成道路边坡,坡高约 1~2 m,坡度为 20°~38°;而海拉尔区土路因多年的车轮碾压,土路沿线形成了深度约 20—30 cm 的轮坑。研究区气候属温带半干旱大陆性气候,其特点是冬季严寒漫长,夏季湿凉短促,春季干旱多大风,秋季降温急骤霜冻早。年平均

气温约 -2.2 ℃,年降水量 339 mm,无霜期 90~110 d。省道 S203 采样区为四纪河湖相沉积物上发育的砂质壤土,海拉尔区土路采样区为壤质砂土,植被均以针茅、羊草和百里香为主的典型草原,土壤类型为栗钙土。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2012 年 9 月在省道 S203 路段,设置道路两侧边坡坡顶和坡底、离坡底 0—30 m,30—210 m 等 4 个样带;而土路路段,因没有边坡,采样带布置在轮坑和离路边 0—30 m,30—210 m 等 3 个带。每个样带内任意布置样方(1 m×1 m)3~9 个,在每个采样方块内用不锈钢土壤环刀取表层土(0—10 cm)样 3 个,充分混合之后称重,取 1 kg 的土壤样品装入密封袋,在 2 个样区共采集 54 个样品。用 GPS 测定样方地理坐标,用皮尺测量距离,用罗盘测定坡度,植被覆盖度和土壤紧实度(用土壤紧实度计 TYD-1)均在野外测量。样品带回实验室,在室内经自然风干 35 d,并研磨、混匀、过筛后按粒径大小分开装袋,以备实验分析。

2.2 实验测定

土壤颗粒组成的测定,首先将土样用孔径为 2 mm 的筛子过筛,用 1/10 000 天平称重并记录。粒径 <2 mm 部分取出 50 g,用过筛法测定粒径 2~1 mm 部分,用沉降法和吸管法测定粒径 1~0.02 mm,0.02~0.002 mm 和 <0.002 mm 部分。用 60 ml 浓度为 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠溶液作为分散剂,煮沸时间为 10 min,振荡时间为 1 h,煮沸样悬液吸管取样深度为 8 cm,振荡样悬液吸管取样深度为 10 cm,用 Stokes 定律计算各级土粒含量百分比^[14-16]。

2.3 统计分析

将土壤粒度分析结果输入到 SPSS 20.0 软件进行描述统计和正态性检验;测试数据输入到 ArcGIS 10.0 进行克里金插值和半方差分析。

3 结果分析与讨论

3.1 道路沿线土壤表层不同颗粒组成空间变异特征

对 54 个样品数据按道路类型分组,用 SPSS 软件进行描述统计和用 Shapiro-Wilk(S-W)法来检验分布正态性(表 1)。结果表明在显著性水平为 0.05 时,除了省道 S203 沿线土壤黏粒含量属于正态分布以外,其余所有参数均属于非正态分布。因此,采用 Mann-Whitney U(M-W U)非参数检验法检验了省道 S203 和土路沿线土壤参数差异的统计显著性。

1997 年 White 等^[17]首次应用克里金插值法绘制出较可靠的美国土壤锌元素含量分布图,由于样品数据非正态分布,在克里金差值之前分别对正偏态数据进行 Log 转换和负偏态数据进行 Cox-Box(平方根)转换,保证了数据的方差齐性。表明省道 S203 粉粒含量变异最大,0.58%~14.4%之间,变异系数为 95.96%。在道路边坡以及距离边坡 0~30 m 范围内粉粒含量最小,小于 3.536%;随着离路边距离的增加,粉粒含量增加,沿着道路明显呈带状分布,说明 S203 道路对沿线土壤表层粉粒含量影响很大。石砾含量变化 0.2%~2.01%之间,变异系数为 88.05%,

省道 S203 对其有一定影响。砂粒和黏粒变异系数较小,但是在边坡附近砂粒含量大,黏粒含量小,砂粒和黏粒沿着道路呈带状分布;土路沿线土壤砾石、砂砾、粉粒和黏粒变异均较小,按变异系数大小排列为:石砾(37.96%)>黏粒(31.68%)>粉粒(28.08%)>砂粒(3.86%),说明土路对沿线土壤石砾含量和黏粒含量的影响较大。同时,土路轮坑附近黏粒和粉粒含量较大,分别是 9%~10.25%和 8.05%~9.07%之间,而石砾和砂粒含量中等。在显著性水平为 0.05 时,省道 S203 和土路沿线土壤表层砂粒和黏粒含量差异显著,而石砾和粉粒含量无显著差异。

表 1 不同道路沿线土壤属性参数描述统计及 M-W U 检验

道路	参数	石砾/ %	砂砾/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	土壤紧实度/ (kg·cm ⁻²)	植被覆盖 度/%	植被高 度/cm
省道 S203	平均值	0.79	80.17	6.45	11.34	0.70	10.00	10.00
	最小值	0.20	73.01	0.58	9.58	2.70	75.00	78.00
	最大值	2.01	89.39	14.40	13.27	1.48	61.91	50.64
	标准差	0.70	7.33	6.19	1.40	0.59	17.90	24.26
	变异系数%	88.05	9.14	95.96	12.38	39.62	28.92	47.91
正态性检验	S-W 统计量	0.46	0.89	0.84	0.96	0.87	0.37	0.41
	p 值	0	0	0	0.363	0.001	0	0
土路路段	平均值	0.47	84.82	6.53	8.37	0.70	10.00	10.00
	最小值	0.20	81.29	4.31	4.00	2.70	75.00	78.00
	最大值	0.66	89.77	9.07	10.25	1.54	62.56	55.11
	标准差	0.18	3.27	1.83	2.65	0.47	14.50	20.01
	变异系数%	37.96	3.86	28.08	31.68	8.73	10.30	9.43
正态性检验	S-W 统计量	0.79	0.79	0.83	0.69	0.88	0.83	0.73
	p 值	0	0.003	0.001	0	0.009	0.001	0
非参数检验	M-W U 统计量	299.50	84.00	256.00	30.00	349.50	206.00	304.00
	p 值	0.32	0.00	0.08	0.00	0.90	0.01	0.36

3.2 不同道路对沿线土壤表层颗粒组成空间变异的影响

空间相关性理论认为空间数据的变异特征用结构方差图中的块金值和基台值之间的比值(基底效应)来反映,比值越大,空间相关性越弱,相应地,空间数据的变异主要是由外部随机因素引起的;相反,基底效应值小,则空间相关性强,空间数据的变异由内部因素引起的。

应用 Wei 等^[18]2009 年提出的空间相关程度分级标准:当基底效应值<25%时,为强自相关;当基底效应值 25%~75%时,中等自相关;当基底效应值>75%时,弱自相关。最佳拟合半方差函数的选择主要根据拟合后的平均标准化误差最小的原则,选用环球(Spherical)模型作为拟合模型,半方差分析结果

(表 2)表明,环球模型拟合的平均标准化误差为-0.01~0.08 之间,说明克里金空间插值精度较高。省道 S203 沿线土壤表层石砾和粉粒含量自相关程度弱和中等,说明受道路和人类活动的影响程度强和中等,而砂粒和黏粒含量空间自相关性强,道路对其影响较小;而土路对沿线土壤表层粉粒含量呈弱自相关,受道路的影响程度强,其余颗粒组成呈空间中等自相关,道路对其影响中等。

3.3 道路沿线土壤表层颗粒组成空间变异的其它影响因素

据实地调查,道路以及沿线车轮碾压和人蓄踩踏等活动改变了土壤紧实度,沿线植被也受一定程度的破坏,表现为植被群落组成、覆盖度和高度发生变化。采用相关分析法计算了土壤颗粒组成和土壤紧实度、

植被覆盖度和植被高度之间的皮尔森相关系数(表 3)。由表 3 可以看出,在显著性水平 0.01 的情况下土壤紧实度与土壤表层粉粒含量呈正相关关系(0.461),与砂粒含量呈负相关(-0.409)。在显著性

水平 0.05 的情况下土壤石砾含量与土壤紧实度呈正相关(0.333),粉粒含量与植被高度呈正相关(0.286),但相关程度均较弱。因此,道路沿线土壤紧实度和植被高度与粉粒、砂粒和石砾含量相关性显著。

表 2 路边土壤表层不同颗粒含量半方差分析

道路	统计参数	变程/ m	块金值 (C_1)	基台值 (C_2)	基底效应 (C_1/C_2)/%	平均标准 误差	空间自相关 程度
土路	石砾	88.93	0.18	0.29	62.71	-0.01	中等
	砂砾	172.11	0.00	0.00	42.73	-0.01	中等
	粉粒	186.05	0.07	0.07	100.00	0.01	弱
	黏粒	194.28	0.12	0.23	51.97	0.02	中等
S203	石砾	226.84	1.54	1.54	100.00	0.08	弱
	砂砾	11.27	0.00	0.01	0.00	0.04	强
	粉粒	33.13	0.74	1.34	55.39	0.06	中等
	黏粒	29.60	0.00	0.02	17.27	0.01	强

表 3 路边土壤表层不同颗粒含量与影响因素之间的相关系数

项目	土壤紧实度	植被覆盖度	植被高度
石砾	0.333*	-0.099	-0.116
砂砾	-0.409**	-0.252	-0.259
粉粒	0.461**	0.265	0.286*
黏粒	0.046	0.242	0.232

注: * 显著性水平为 0.05; ** 显著性水平为 0.01。

4 结论

(1) 受道路沿线人类活动影响,呼伦贝尔草地省道 S203 和土路沿线 0~210 m 范围表层土(0—10 cm)土壤表层不同颗粒组成空间分布发生改变,黏粒含量形成了沿着道路带状分布的空间分布特征。省道 S203 土壤粉粒和黏粒含量随着与样点与道路间的距离的增加而增加,其可能原因是道路边坡土壤松散,紧实度小,表层细颗粒容易侵蚀,土壤紧实度与粉粒含量呈正相关;土路轮坑附近土壤紧实度大,土壤粉粒和黏粒含量随着与样点与道路间的距离的增加而减少。省道 S203 对沿线土壤粉粒和石砾含量空间变异影响较大,而土路对石砾和黏粒的影响较大,其部分原因是与铺设道路所使用土方颗粒组成有关之外,道路沿线人类活动改变了土壤紧实度和植被高度,土壤紧实度和植被高度大的地点,土壤粉粒含量高。

(2) 在地形平坦的呼伦贝尔草地应用克里金法进行土壤颗粒组成的空间插值误差小,标准化误差—0.01~0.08 之间。二维克里金空间插值图清楚地显示了道路沿线土壤颗粒组成的带状分布特征,与传统的密集的采样点分析和绘制土壤颗粒组成剖面图等

方法相比精度高,并节约了人力物力。半方差分析法较好地区分和评价了道路沿线土壤表层颗粒组成空间变异的内在影响因素和人类活动对其影响程度。

(3) 道路沿线表层颗粒组成空间变异是土壤侵蚀研究中的新课题,今后需要选择多种路段进行对比研究,总结其规律和差异性。

[参 考 文 献]

- [1] 余海龙,顾卫,姜伟,等. 高速公路路域土壤质量退化演变的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(4):195-198.
- [2] 胡晋茹,杨建英,赵强,等. 公路建设的生态影响与生态公路建设[J]. 中国水土保持科学,2006(12):144-147.
- [3] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, et al. Road ecology: science and solutions[M]. Inland Press, 2002: 3-397.
- [4] Trombulak S C, Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities [J]. Conservation Biology, 2000,14(1):18-30.
- [5] 胡霞,刘连友,孙永亮,等. 交通对干草原土壤物理性质影响的试验研究[J]. 土壤学报,2006,43(2):215-219.
- [6] Vollmer A T, Maza B G, Medica P A, et al. The impact of off-road vehicle on a desert ecosystem[J]. Environmental Management, 1976,1(2):115-129.
- [7] Chancellor W J. Effects of compaction on soil strength [J]. Compaction of Agricultural Soils, 1971,11(3):191-214.
- [8] Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. Water Resour Research, 1984,20(6):682-690.

(下转第 27 页)

蚀的临界盖度介于60%~80%。0~23 cm高度的集沙仪收集到的风蚀物主要是由蠕移颗粒和大部分的跃迁颗粒组成,这一高度内收集到的风蚀物占整体风蚀量的70%以上。

[参 考 文 献]

- [1] 洪光宇. 退化草原羊草种群根系形态特征对水分与氮素梯度的响应[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [2] 刘元宝,唐克丽,查轩,等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报,1990,4(1):25-29.
- [3] 罗伟祥. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报,1990,4(1):30-35.
- [4] 焦菊英,王万忠. 人工草地在黄土高原水土保持中的减水减沙效益与有效盖度[J]. 草地学报,2001,11(3):176-182.
- [5] 马志林. 三峡库区坡耕地水土流失特征及防治效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [6] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1):74-80.
- [7] 韩永伟,韩建国,张蕴薇,等. 农牧交错带草地植被的水土保持作用研究[J]. 水土保持学报,2004,18(4):24-28.
- [8] 董治宝,陈渭南,李振山,等. 风沙土水分抗风蚀性研究[J]. 水土保持通报,1996,16(2):17-23.
- [9] 黄富祥,牛海山,王明星,等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报,2001,56(6):700-710.
- [10] 王翔宇,赵名彦,丁国栋,等. 天然灌草植被防治土壤风蚀机理[J]. 水土保持通报,2008,28(5):55-59.
- [11] 郭忠升. 水土保持林有效覆盖度及其确定方法的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):67-72.
- [12] 焦菊英,王万中,李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J]. 植物生态学报,2000,24(5):8-12.
- [13] 张光辉,梁一民. 论有效植被盖度[J]. 中国水土保持,1996(5):28-29.
- [14] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [15] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报,2006,26(9):137-143.
- [16] 王光谦,张长春,刘家宏,等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J]. 泥沙研究,2006(2):10-16.
- [17] 刘斌,罗全华,常文哲,等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学,2008,28(6):68-73.
- [18] 罗伟祥,白立强,宋西德,等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报,1990,4(1):32-37.
- [19] 张光辉,梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [20] 关法春,梁正伟,王忠红,等. 方格法与数字图像法测定盐碱化草地植被盖度的比较[J]. 东北农业大学学报,2010,54(1):130-133.
- [21] 周佩华,张学栋,唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置[J]. 水土保持通报,2000,20(4):27-30.
- [22] 勃海锋. 模拟降雨条件下人工苜蓿和柠条群落对产流、产沙的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [23] 赵永来. 利用移动式风洞测试评估植被盖度对土壤风蚀的影响[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.
- [9] Gui Dongwei, Lei Jiaqiang, Zeng Fanjiang, et al. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands: A case study of the Cele Oasis[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51(11): 1306-1311.
- [10] Jim C Y. Physical and chemical properties of a Hongkong roadside soil in relation to urban tree growth[J]. Urban Ecosystems, 1998, 2(2/3): 171-181.
- [11] Li Qian, Ji Hongbing, Qin Fei, et al. Sources and the distribution of heavy metals in the particle size of soil polluted by gold mining upstream of Miyun Reservoir, Beijing: Implications for assessing the potential risks[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(10): 6605-6626.
- [12] 李月辉,胡远满. 道路生态研究进展[J]. 应用生态学报,2003,14(3):447-452.
- [13] 宗跃光,周尚意,彭萍,等. 道路生态学研究进展[J]. 生态学报,2003,23(11):2396-2405.
- [14] Klute A. Methods of soil analysis(Part 1): Physical and Mineralogical Methods[M]. American Society of Agronomy, Inc., 1986: 363-375.
- [15] 韩立发,刘亚龙. 试论沉降法测定颗粒粒度及其分布[J]. 水泥工程,2005(6):19-21.
- [16] 章明奎,姜宏. 用微量吸管法测定红壤颗粒组成的研究[J]. 浙江大学学报,2001,27(6):649-6511.
- [17] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil zinc map of the USA using geostatistics and geographic information systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 185-194.
- [18] Wu Wei, Xie Deti, Liu Hongbin. Spatial variability of soil heavy metals in the three gorges area: Multivariate and geostatistical analyses[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(1/4):63-71.

(上接第21页)