

太湖流域典型农用地面源磷流失的 土壤主控因子光谱识别

熊俊峰^{1,2}, 林晨², 马荣华², 吴治澎³, 闵敏^{2,4}

(1. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210046; 4. 河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心, 河南 开封 475001)

摘要: [目的] 通过光谱识别太湖流域农用地面源磷流失的土壤主控因子, 为简化面源磷流失强度估算提供依据。[方法] 通过分析梅梁湾流域耕地和园地中不同面源磷流失强度下的土壤光谱特征, 确定影响面源磷流失强度的主要土壤理化性质。[结果] 耕地面源磷流失强度的特征波段为 650~670 nm, 1 475 nm 和 1 680~1 695 nm, 土壤主控因子是有机质, 二者之间呈正相关; 园地面源磷流失强度的特征波段为 685~690 nm, 710~720 nm, 1 110~1 115 nm, 1 150~1 155 nm 和 2 170 nm, 主控因子是有机质、水分和 Fe^{2+} , 分别和面源磷流失强度呈负相关、正相关和负相关; 有机质对耕地的面源磷流失强度的影响更加显著: 耕地面源磷流失强度与光谱指数间的相关系数在 1 685 nm 处达到 0.74, 而园地条件下相关系数最高值在 715 nm 处仅为 0.48。[结论] 耕地面源磷流失主控因子为有机质, 园地的主控因子为有机质、水分和 Fe^{2+} 。

关键词: 光谱; 磷流失; 水分; 有机质; 土地利用

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)02-0137-05

中图分类号: TP79, S151.9

文献参数: 熊俊峰, 林晨, 马荣华, 等. 太湖流域典型农用地面源磷流失的土壤主控因子光谱识别[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 137-141. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.020; Xiong Junfeng, Lin Chen, Ma Ronghua, et al. Spectral Identification of Main Control Factors of Soil Phosphorus Loss from Typical Agricultural Land in Taihu Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 137-141. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.020

Spectral Identification of Main Control Factors of Soil Phosphorus Loss from Typical Agricultural Land in Taihu Basin

XIONG Junfeng^{1,2}, LIN Chen², MA Ronghua², WU Zhipeng³, MIN Min^{2,4}

(1. School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 3. School of Geographic and

Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 4. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475001, China)

Abstract: [Objective] This study was to simplify the estimation of phosphorus loss intensity, through identifying key soil properties affecting non-point source phosphorus loss by spectral analysis, in agricultural land of Taihu Basin. [Methods] To identify the key soil physical and chemical properties affecting non-point source phosphorus loss, the spectral characteristics of soil from arable land and orchard land at Meiliang Bay watershed, Taihu Basin were contrasted. [Results] The characteristic bands of non-point source phosphorus loss were 650~670 nm, 1 475 nm and 1 680~1 695 nm in arable land, suggesting that soil organic matter

收稿日期: 2016-07-14

修回日期: 2016-09-09

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“典型林耕地转换模式下颗粒态磷流失的土壤主控因子光谱甄别”(41301227)

第一作者: 熊俊峰(1993—), 男(汉族), 江西省九江市人, 硕士研究生, 研究方向为领域为生态环境效应遥感监测。E-mail: xjfpanda@163.com。

通讯作者: 林晨(1984—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态环境效应遥感监测。E-mail: Clin@niglas.ac.cn。

was the main factor controlling non-point source phosphorus loss due to the positive correlation between soil organic matter content and non-point source phosphorus loss intensity. The characteristic bands of non-point source phosphorus loss were 685~690 nm, 710~720 nm, 1 110~1 115 nm, 1 150~1 155 nm and 2 170 nm in orchard land, which suggested that soil organic matter, moisture and Fe^{2+} were the main controlling factors of non-point source phosphorus loss intensity. Non-point source phosphorus loss intensity was negatively correlated with soil organic matter content and Fe^{2+} , while it was positively correlated with water content. The effect of the source phosphorus loss on the arable land was more significant. The correlation coefficient between the surface source phosphorus loss intensity and the spectral index reached 0.74 at 1 685 nm in arable land. The highest correlation coefficient was only 0.48 at 715 nm in orchard land. [Conclusion] The key soil property in arable land was soil organic matter, and the key soil properties in orchard land was soil organic matter, moisture and Fe^{2+} .

Keywords: spectrum; phosphorus loss; moisture; organic matter; land use

农业面源污染是流域水体富营养化的重要来源,面源磷流失强度受到土壤性质、土地利用、植被覆盖和降雨等多方面因素影响^[1-2],而实际上大多数影响因素会首先改变土壤理化性质,进而对磷流失强度产生影响,所以土壤理化性质是判断面源磷流失强度的直接依据。而利用反射光谱判断土壤理化特性的研究已经十分成熟^[3],因此,利用光谱技术,快速甄别影响面源磷流失的土壤理化性质对农业面源污染的合理管控具有重要的科学意义。近年来,国内外已有许多学者致力于研究土壤理化性质和光谱特征间的关系,目前土壤水分、有机质和铁等土壤理化性质的研究比较丰富,其光谱特征波段已经受到大多数学者认可(表 1)^[3-14]。其中,土壤水分和有机质在 1 400 和 2 200 nm 处会相互影响,二者的含量增多会降低全波段的反射率^[12];土壤的机械组成对土壤光谱特征也有较大的影响,土壤粒径越小,其反射率越高,但是随着土壤黏粒含量提高,土壤含水量会增多,从而造成反射率下降^[14-15]。土壤中氮元素与土壤有机质结合紧密,虽然存在光谱特征却容易受到有机质掩盖^[16-17];土壤中磷元素的光谱研究多集中于对总磷和有效磷含量的定量估算,对磷的特征波段研究较少,另一方面磷与有机质结合紧密,其光谱特征受到有机质光谱特征影响严重^[18],磷与整个波段内的反射光谱表现出了低相关性^[19]。通过土壤光谱定性判断土壤理化性质的研究成果十分丰富,而土壤中磷元素的光谱响应机理还不明确,所以无法根据土壤光谱特征直接判断磷含量的高低及其流失强度,但是,磷与有机质、机械组成、土壤水分等土壤理化性质关系紧密,而这些指标的光谱特征相对明确,因此,通过筛选影响磷流失的关键理化性质,进而实现面源磷流失的光谱快速监测是可行的。

本研究以太湖梅梁湾流域为研究区,将农业用地分为耕地和园地,面源磷流失强度分为高值区和低值区,通过野外实测光谱对比不同面源磷流失强度的土壤光谱特征,提取出光谱响应特征波段,分析影响面源磷流失的主要土壤理化性质,实现面源磷流失的土壤主控因子识别,为简化面源磷流失强度估算提供依据。

表 1 主要土壤理化性质的光谱响应波段

土壤理化性质	光谱响应波段/nm
水分	1 400,1 900,2 200
有机质	580,600~800,820,1 400,2200
机械组成	450,490
Fe^{2+}	430,510,550,1 000~1 100
Fe^{3+}	400,450,490,520,700,870
CO_3^{2-}	1 900,2 000,2 160,2 350,2 550
C-H	1 700,2 300

1 材料与方法

1.1 研究区划分

以太湖梅梁湾流域为研究区,根据课题组已有的研究基础,首先利用 ArcSWAT 划分子流域确定研究区范围,利用 ENVI 5.2 和 ArcGIS 10.2 软件,根据降雨数据、遥感影像数据、数字高程模型和土地利用数据,结合小区试验,通过 USLE 模型和 PLOAD^[20]模型计算研究区面源磷流失强度^[1]。根据面源磷流失强度(图 1),结合太湖流域典型农用地类型:耕地和园地(附图 7)。将研究区分为 4 类区域:(1)耕地高值区;(2)耕地低值区;(3)园地高值区;(4)园地低值区。从中选取 23 个典型代表区域为采样区,进行野外光谱实测,高值区选取流失强度大于 1.2 kg/km^2 的区域,低值区选取流失强度低于 0.8 kg/km^2 的区域,4 类区域的采样区个数依次为 4,5,6,8 个。

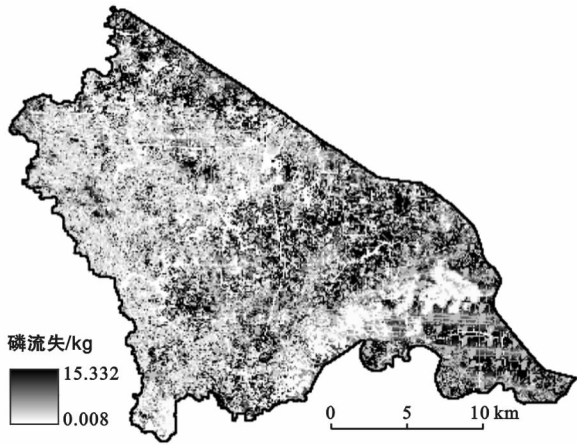


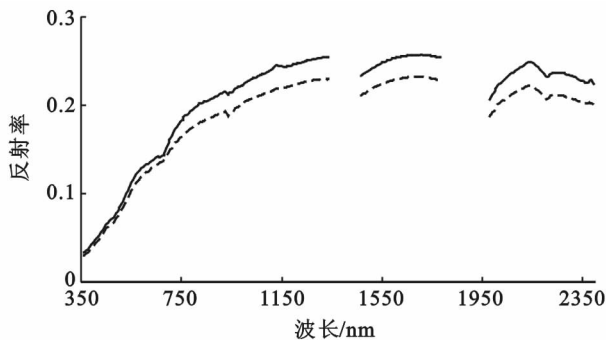
图 1 研究区面源磷流失强度分布

1.2 光谱数据采集

野外实地光谱采集使用的是 ASD FieldSpec3 手持便携式光谱仪,测定波段为 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 光谱分辨率为 3 nm,1 000~2 500 nm 间的光谱分辨率为 10 nm。数据采集在晴天少云的时间段进行,并在采集前将植被剥离,保证裸土信息获取。测试过程中,在每个采样区内随机选择 3 个光谱采集点,每个采集点测定 5 次取算术平均值,共得到 69 个采样点的光谱数据。为了消除外界噪声影响,首先对光谱数据进行 9 点 Savitz-Golay 卷积平滑法^[3]处理;然后为了减少光谱变量,对光谱数据进行 5 nm 间隔的重采样,作为实际反射光谱曲线。

1.3 光谱数据分析

由于野外实地光谱采集受到外界因素的干扰较大,故删去噪声较大的 3 个波段 1 345~1 455 nm,1 790~1 970 nm 和 2 400~2 500 nm。首先将光谱曲线根据面源磷流失强度分为高低值,通过去包络线处理突出光谱吸收特征,对比不同面源磷流失强度下的土壤光谱差异。然后根据用地类型进一步划分耕地和园地,并对实际光谱反射率(reflectance, R)进



行 5 种变换处理:(1) 去包络线(continuum removal, CR);(2) 去包络线导数(continuum removal derivative, CRD);(3) 对数(logarithm, L);(4) 对数导数(logarithmic derivative, LD);(5) 一阶导数(first derivative, FD),计算面源磷流失强度与这 6 种形式数据之间显著系数,显著系数越低显著性越高,选取显著性最高的 5 个波段确定面源磷流失强度的土壤主控因子。最后根据显著系数选取显著性最好的光谱指数曲线,计算光谱指数曲线和面源磷流失强度的相关系数,分析不同用地类型下,土壤主控因子对面源磷流失强度的影响机理。

2 结果与分析

2.1 不同面源磷流失强度光谱特征分析

由于野外实测得到的光谱反射率较低,为了突出其吸收特征,对光谱曲线进行去包络线处理,图 2 为不同面源磷流失强度下光谱反射率及其去包络线。由图 2 可知,整体上两条曲线反射率都较低,但是高值区反射率曲线明显高于低值区反射率曲线,造成整体反射率存在差异的原因可能是有机质,水分或机械组成^[3];高值曲线和低值曲线的变化趋势基本一致,但是在 700 nm 处高值曲线比低值曲线的吸收峰深,1 100 nm 附近高值曲线有一明显的反射峰,而低值曲线在此处较平滑,对照表 1 可知,700 nm 处为有机质吸收波段,1 100 nm 处为 Fe^{2+} 的吸收波段,说明有机质和 Fe^{2+} 对面源磷流失有影响。2 条去包络线仅在 700 nm 处存在明显差异,可以筛选出有机质是影响面源磷流失强度的主控因子。去包络线在其他波段基本重合,说明笼统地对比农用地高值区和低值区的光谱特征效果不佳,所以接下来将农用地继续进一步划分为耕地和园地,判断不同用地类型下面源磷流失强度的土壤主控因子。

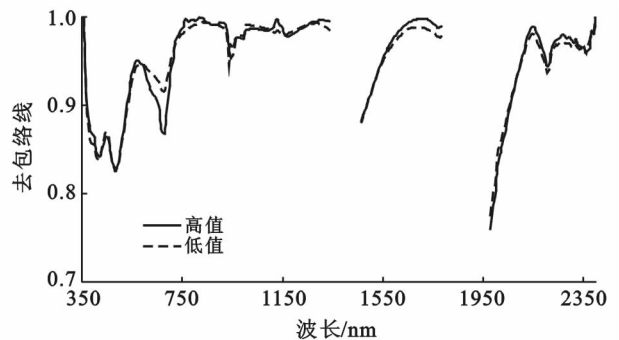


图 2 不同面源磷流失强度土壤的光谱曲线与去包络线

2.2 不同用地类型下面源磷流失土壤主控因子识别

为了确定不同用类型下面源磷流失强度的土壤

主控因子,将光谱曲线按照用地类型和流失强度分为

4 类区域后分析不同光谱指数与面源磷流失的显著性, 从中选取显著性最好的 5 个波段(表 2)。在耕地条件下, CRD 和 FD 两种变换形式的光谱指数和面源磷流失强度的显著性最高; 而园地条件下, 经过 FD 变换后的光谱指数和面源磷流失强度的显著性最高。将表 2 中的波段对照表 1 可以看出, 在耕地条件下, 670 nm 为有机质的吸收波段, 1 680, 1 685 和 1 690 nm 这 3 个波段接近 C-H 的吸收波段, 2 045 nm 接近 CO_3^{2-} 的吸收波段, 所以有机质影响耕地面源磷流失强度的主要因子; 在园地条件下, 715 和 720 nm 是有机质吸收波段, 1 115 和 1 150 nm 接 Fe^{2+} 吸收波段,

2 170 nm 接近水的吸收波段, 所以有机质、 Fe^{2+} 和水分是影响园地面源磷流失强度的土壤主要因子。耕地条件下光谱指数和面源磷流失强度的显著系数明显低于园地的, 说明有机质对耕地面源磷流失强度的影响大于对园地面源磷流失强度的影响。综上所述, 可以确定耕地面源磷流失强度的土壤主控因子是有机质, 园地面源磷流失强度的土壤主控因子是有机质、水分和 Fe^{2+} 。虽然两种用地类型下的土壤主控因子都包括有机质, 但是有机质在 2 种用地类型下的作用不同, 主要体现在二者对面源磷流失的影响程度与作用方式上。

表 2 面源磷流失强度和光谱指数间的显著系数

序号	耕地			园地		
	波长/nm	显著系数	变换形式	波长/nm	显著系数	变换形式
1	1 685	0.000 01	CRD	715	0.001 35	FD
2	2 045	0.000 03	FD	2 170	0.001 41	FD
3	1 680	0.000 07	CRD	1 150	0.001 75	FD
4	670	0.000 09	CRD	720	0.002 14	FD
5	1 690	0.000 19	CRD	1 115	0.002 71	FD

注: CRD 为去包络线导数, FD 为一阶导数。

2.3 不同用地类型下土壤理化性质对面源磷流失强度的影响机理

根据表 2, 耕地选取光谱经过 CRD 变换后的曲线, 园地选取光谱经过 FD 变换后的曲线, 计算其与面源磷流失强度的相关系数(图 3)。从耕地光谱指数和面源磷流失强度的相关系数图可以看出, 相关系数最高值在 1 685 nm 处达到 0.74; 在 650~670 nm, 1 475 nm, 1 680~1 695 nm 处相关系数较高, 即为特征波段; 根据表 1 可知, 650~670 nm 处为有机质的吸收波段, 面源磷流失强度和去包络线导数在此处呈负相关, 表明当去包络线导数越小时, 去包络线数值在此处下降快, 吸收峰深, 有机质含量高, 则面源磷流失强度大, 即说明有机质含量和面源磷流失强度呈正相关; 1 475 nm 处接近土壤水分和有机质的吸收波段, 说明其和面源磷流失强度呈负相关; 1 680~1 695 nm 处接近 C-H 的吸收波段, 说明其和面源磷流失强度呈负相关。

综合 3 处光谱曲线特征可知, 由于在耕地中的灌溉行为频繁, 导致土壤水分含量大, 而耕地的有机质含量低, 所以有机质的部分吸收特征被水分掩盖, 可以认为耕地条件下有机质含量越高, 水分含量越低, 则面源磷流失强度越大。从园地光谱指数和面源磷流失强度的相关系数图可以看出, 相关系数最高值在 715 nm 处达到 0.48; 在 685~690 nm, 710~720 nm,

1 110~1 115 nm, 1 150~1 155 和 2 170 nm 处相关系数较高, 即为特征波段; 根据表 1 可知, 685~690 nm 和 710~720 nm 这 2 个波段为有机质吸收波段, 面源磷流失强度和导数在此处呈正相关, 说明有机质含量和面源磷流失强度呈负相关; 1 110~1 115 nm 接近 Fe^{2+} 的吸收波段, 其和面源磷流失强度在此处呈正相关; 2 170 nm 接近水分和有机质吸收波段, 其和面源磷流失强度呈正相关。可以认为园地条件下有机质和 Fe^{2+} 含量越高, 土壤水分含量越低, 则面源磷流失强度越低。

有机质和水分都是 2 种用地类型面源磷流失强度的土壤主控因子, 但是二者在 2 种用地类型下影响机理却相反, 这是因为 2 种用地类型下面源磷流失的机理有所不同。相比于耕地, 园地地表坡度较大, 降雨时更容易造成水土流失, 面源磷流失形态以颗粒态磷所占比例更大, 所以, 在园地条件下: (1) 土壤含水量越高, 越容易产生径流, 造成水土流失; (2) 有机质含量低, 土壤黏性下降, 也容易造成水土流失^[22]。在耕地条件下, 地面坡度较平缓, 降雨时径流流速较慢, 对地表的冲刷作用不剧烈, 所以相比于园地, 颗粒态磷流失量减少, 溶解态所占比重增大, 所以在耕地条件下: (1) 由于降雨时会首先产生壤中流带走溶解态磷, 土壤蓄满后才会产生径流^[2], 所以土壤水分含量少, 溶解态磷流失量大; (2) 土壤有机质含量和磷含

量显著相关,所以土壤中有有机质含量越高,磷含量也越高^[23],面源磷流失强度也越高。由此可见,土壤有机质含量对磷流失起着十分重要的作用,有机质含量低,一方面导致土壤黏性小,容易产生水土流失,另一

方面导致磷含量低。但是土壤黏性和磷含量对磷流失的影响还需进一步研究,今后的研究中需要探索二者在不同坡度和土壤含水量的情况下,对不同形态磷流失的影响能力。

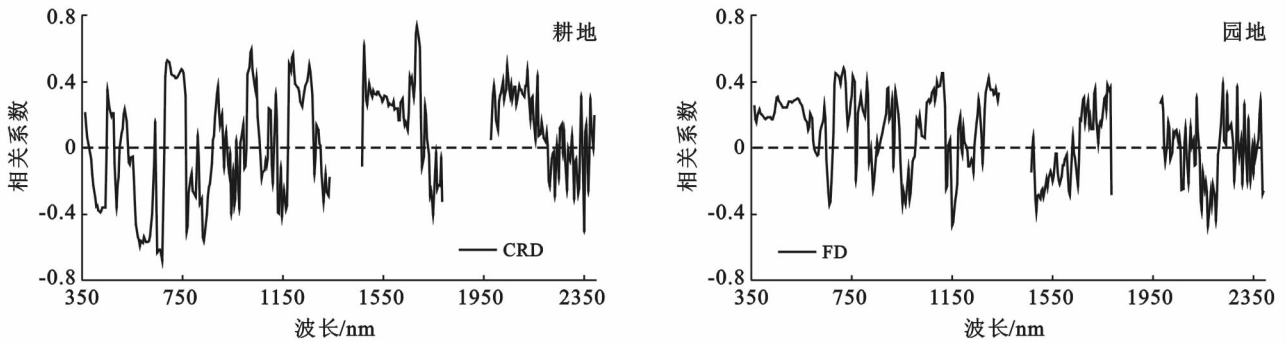


图 3 光谱指数和面源磷流失强度间的相关系数

3 结论

通过对太湖流域典型农用地不同面源磷流失强度区域的土壤光谱研究,证明了农用地面源磷流失强度的土壤主控因子是有机质,根据前人研究,一方面由于土壤中有有机质含量影响植物生长,植被的生长状况对水土保持有着重要影响^[21];另一方面有机质影响土壤黏性,土壤黏性对水土流失也有重要影响^[22];土壤中有有机质和磷结合紧密^[18],土壤中有有机质含量高低可以指示磷含量高低,土壤磷含量对面源磷流失有着直接影响。进一步划分用地类型为耕地和园地后,可以确定耕地面源磷流失强度的土壤主控因子是有机质,其面源磷流失强度和土壤有机质含量呈正相关;园地面源磷流失强度的土壤主控因子是有机质、水分和 Fe^{2+} ,其面源磷流失强度和土壤有机质呈负相关,和水分呈正相关,和 Fe^{2+} 呈负相关。虽然两种用地类型下的面源磷流失强度土壤主控因子都是有机质,但是有机质在 2 种用地类型下的作用相反,并且对耕地的面源磷流失强度的影响更加显著,说明在园地条件下,外界环境复杂,导致面源磷流失强度受到的影响因素变多,另一方面说明不同外界条件下,面源磷流失的机理有所差异^[1-2],有机质的作用也不一样。研究表明通过光谱可以快速甄别平原地区农用地面源磷流失强度,在今后的研究中,可以进一步探索不同外界条件下这些主控因子对面源磷流失的影响机理,并根据这些主控因子简化面源磷流失强度的估算模型,提高估算效率,进而为农业面源污染的治理提供依据。

[参 考 文 献]

[1] Lin Chen, Wu Zhipeng, Ma Ronghua, et al. Detection

of sensitive soil properties related to non-point phosphorus pollution by integrated models of SEDD and PLOAD[J]. *Ecological Indicators*, 2016,60:483-494.

- [2] 陈玲. 香溪河流域典型坡耕地氮磷流失机理研究[D]. 湖北 宜昌:三峡大学,2013.
- [3] 郑光辉. 江苏部分地区土壤属性高光谱定量估算研究[D]. 江苏 南京:南京大学,2010.
- [4] 燕守勋,张兵,赵永超,等. 矿物与岩石的可见近红外外光谱特性综述[J]. *遥感技术与应用*,2003,18(4):191-201.
- [5] Weber B, Olehowski C, Knerr T, et al. A new approach for mapping biological soil crusts in semi-desert areas with hyperspectral imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(5):2187-2201.
- [6] Bartholomeus H M, Schaepman M E, Kooistra L, et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification [J]. *Geoderma*, 2008,145(1/2):28-36.
- [7] Ladoni M, Bahrami H A, Alavipanah S K, et al. Estimating soil organic carbon from soil reflectance;a review [J]. *Precision Agriculture*, 2010,11(1):82-99.
- [8] Reeves J B. Near-versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done [J]. *Geoderma*, 2010,158(1/2):3-14.
- [9] Rossel R A V, Adamchuk V I, Sudduth K A, et al. Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time [J]. *Advances in Agronomy*, 2011,113(113):243-291.
- [10] 纪文君,史舟,周清,等. 几种不同类型土壤的 VIS_NIR 光谱特性及有机质响应波段[J]. *红外与毫米波学报*, 2012,31(3):277-282.
- [11] 彭杰,周清,张杨珠,等. 有机质对土壤光谱特性的影响研究[J]. *土壤学报*,2013,50(3):517-524.

(下转第 147 页)

的重视,污水治理投资总额以及污水处理设施处理能力大幅增长,其增加速率远高于污水排放总量的增加速率,从而污水处理效率相应提高;

(2)传统的投资效率评价方法不考虑系统的外部效果,得出的结论表明再生水项目的投资效率逐年降低,资金不愿进入,不利于污水再生利用;而考虑外部效果的评价方法,能够更加全面、综合的分析再生水项目的投资效率,得出的结论表明再生水项目的投资效率逐年增加。因此对于再生水项目的投资与建设应该综合考虑其经济效益、环境效益和社会效益,全面分析投入与产出之间的关系,这样更有利于得到政府的支持。

(3)受统计数据和假设条件的限制,本文所建立的系统动力学模型主要考虑了城市生活和工业产生的污水量,考虑的影响因素并不全面,没有考虑农业、第三产业等所产生的污水量,在考虑环境效益和社会效益时只量化了其中的一部分,没有全面的反应再生水项目的外部效果,这正是下一阶段的主要研究工作。

[参 考 文 献]

- [1] 李燕群,何通国,刘刚,等.城市再生水回用现状及利用前景[J].资源开发与市场,2011,27(12):1096-1100.
- [2] 范丽娟,宋晓晖,范云照.浅议污水处理厂运行成本的分

析与管理[J].科技创新与应用,2015(32):274.

- [3] 杨勇,王玉明.我国城镇污水处理厂及运行现状分析[J].给水排水,2011,37(8):35-39.
- [4] 朱向东.中小城市如何避免“水患”.中国建设报[EB/OL],[2012-07-05](2015-03-06).<http://www.zchb.net/news/view?id=72>.
- [5] 郑磊.城市基础设施投资效率问题和对策研究[J].现代商贸工业,2008(12):84-85.
- [6] Forrester Jay W. Industrial Dynamics [M]. US: Pegasus Communications,1961.
- [7] 李旋旗,花利忠.基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响[J].生态学报,2012,32(10):2965-2974.
- [8] 俞海宏,刘南.基于系统动力学的长三角港口群效率模型研究[J].中国航海,2012,35(1):98-104.
- [9] Lin R C, Mustafa Y S, Kalysan S P. Multi-objective simulation optimization using data envelopment analysis and genetic algorithm: Specific application to determining optimal resource levels in surgical services [J]. Omega, 2013,41(5):881-892.
- [10] 陈光宇,王惟贤,邵云飞,等.大科学工程项目效率动态建模方法[J].技术经济,2015,12(12):93-100.
- [11] 孔晓.渭南市水资源开发利用现状及对策研究[J].地下水,2011,33(2):34-35.
- [12] 高旭阔.城市再生水价值评价研究[D].陕西西安:西安建筑科技大学,2010.

(上接第141页)

- [12] 郑光辉,王明江,焦彩霞,等.土壤有机质高光谱估算研究进展[J].南京信息工程大学学报,2013,5(6):481-486.
- [13] 史舟,王乾龙,彭杰,等.中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J].中国科学(D):地球科学,2014,44(5):978-988.
- [14] 马创,申广荣,王紫君,等.不同粒径土壤的光谱特征差异分析[J].土壤通报,2015,46(2):292-298.
- [15] 张娜,张栋良,李立新,等.基于高光谱的区域土壤质地预测模型建立与评价:以河套灌区解放闸灌域为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):67-72.
- [16] Martin P D, Malley D F, Manning G, et al. Determination of soil organic carbon and nitrogen at the field level using near-infrared spectroscopy [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002,82(4):413-422.
- [17] Luce M S, Ziadi N, Zebarth B J, et al. Rapid determination of soil organic matter quality indicators using

visible near infrared reflectance spectroscopy [J]. Geoderma, 2014,232:449-458.

- [18] Lin Chen, Ma Ronghua, Zhu Qing, et al. Using hyper-spectral indices to detect soil phosphorus concentration for various land use patterns [J]. Environ. Monit. Assess, 2015,187(1):4130-4140.
- [19] 徐丽华,谢德体,魏朝富,等.紫色土土壤全氮和全磷含量的高光谱遥感预测[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3):723-727.
- [20] USEPA. PLOAD 3.0 User's Manual [R]. January, 2001.
- [21] 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):3137-3143.
- [22] 杨才敏.土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J].水土保持研究,2008,15(5):177-179.
- [23] 陈书琴,储昭升,胡社荣,等.巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性[J].环境科学,2012,33(9):3031-3037.