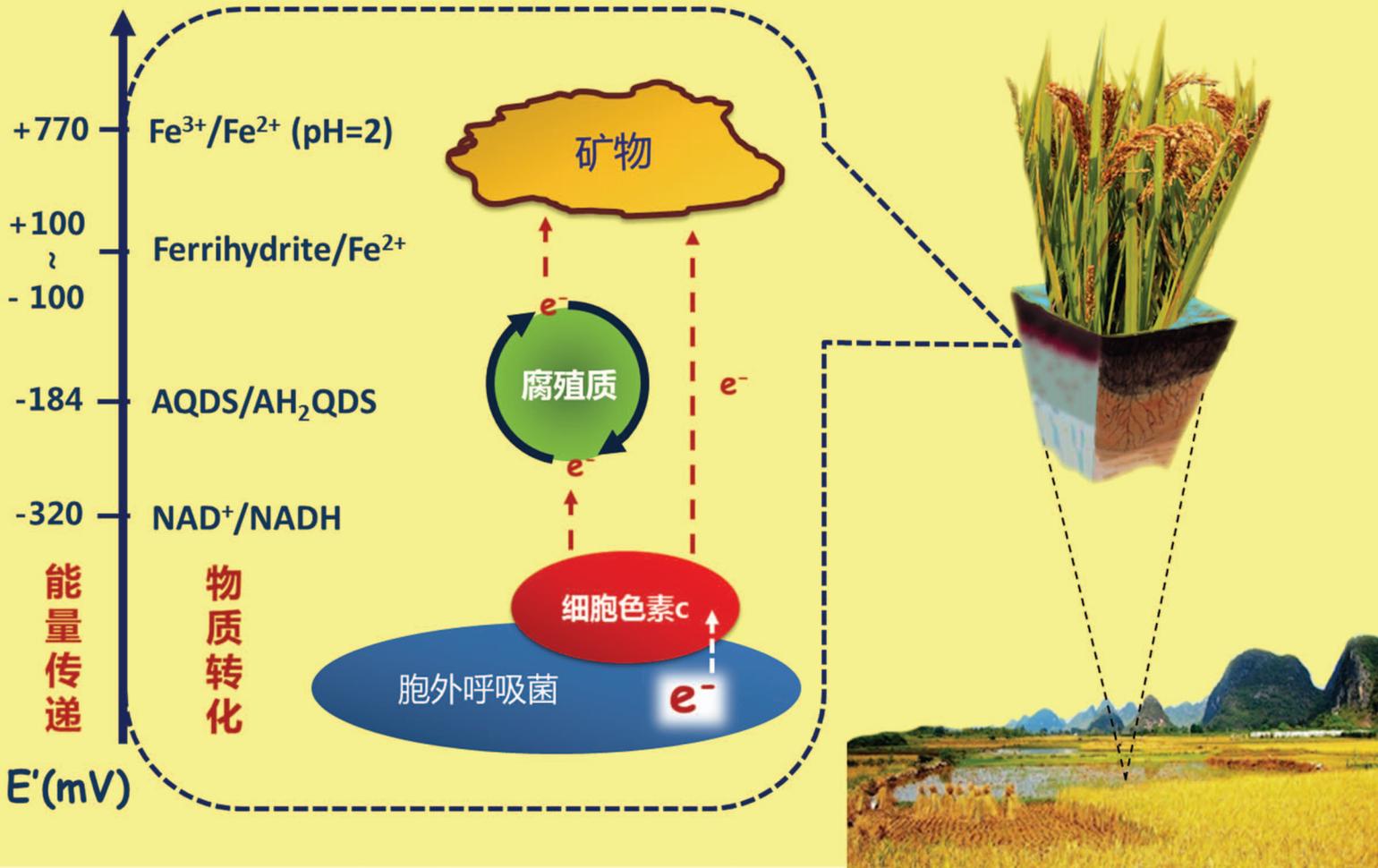


Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

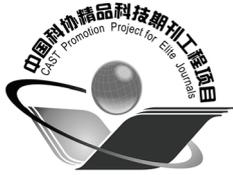


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

目 次

综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 S_3 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张懿锂等 (411)
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

DOI: 10.11766/trxb201508170308

基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的 土壤有机质预测研究*

王茵茵¹ 齐雁冰^{1, 2†} 陈洋¹ 解飞¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 遥感数据已经在数字土壤制图中得到广泛应用, 并且可以一定程度上提高土壤属性预测的精度。本文以榆阳区的黄土丘陵和风沙滩地两种地貌区为例, 利用不同分辨率的专题制图仪 (thematic mapper, TM)、先进宽视场传感器 (advanced wide field sensor, AWIFS) 和中等分辨率成像仪 (Moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 的遥感影像数据 (分辨率分别为 30 m、56 m 和 250 m) 和基于高级热量散射和反射辐射仪全球数字高程模型 (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model, ASTER GDEM) 的地形衍生数据, 结合其他影响土壤有机质分布的辅助因子, 用随机森林算法 (random forest, RF) 对表层土壤有机质进行模拟预测, 并通过实测数据的百分比抽样对预测结果进行了验证。结果表明, 在榆阳区的黄土丘陵区, 基于 TM 数据的土壤有机质预测结果较好; 在风沙滩地区, 基于 AWIFS 数据的土壤有机质预测结果较好。基于 RF 的土壤有机质预测在榆阳区的黄土丘陵区结果较好, 三个分辨率下的平均绝对误差在 1.27 ~ 1.57 g kg⁻¹ 之间, 在风沙滩地区预测精度较低, 平均绝对误差在 1.46 ~ 2.08 g kg⁻¹ 之间。高程、地理位置和植被是影响黄土丘陵区土壤有机质预测的主要因素, 在风沙滩地区, 植被、高程和离水源地的距离是影响有机质预测的主要因素。可见, 在地貌相对简单的地区进行土壤有机质含量的预测时可以使用较低分辨率的数据代替较高分辨率的数据, 同时, RF 算法在复杂地貌区的土壤有机质预测更有效。

关键词 多分辨率遥感数据; 随机森林; 土壤有机质

中图分类号 S127 **文献标识码** A

土壤有机质 (soil organic matter, SOM) 是土壤最具代表性的属性之一, 是评价土壤肥力和土壤质量的一项重要指标^[1], 尤其在干旱与半干旱地区, 土壤有机质在退化生态系统的恢复中起着重要的作用^[2-3]。有机质的空间制图是掌握区域有机质分布状况及了解土壤质量、植被恢复效益的重要途径之一^[4-6]。随着 3S 技术的发展, 借助辅助环境因子的土壤属性预测在数字土壤制图中日益受

到重视^[7], 遥感数据作为反映土壤及植被重要信息的数据源逐渐被学者们应用到土壤属性的预测之中^[8-9], 并发挥独特优势。

在土壤有机质空间预测中, 通常的辅助环境因子包括成土母质、地形地貌、土壤类型、植被等^[10-12]。这些影响因素对土壤有机质分布的贡献程度在不同的环境条件下是有差异的^[13], 因此对辅助因子进行筛选尤为必要。Di Nezio 等^[14]提出

* 国家科技基础性工作专项项目 (2014FY110200A08) 资助 Supported by the Special Foundation of National Science and Technology Basic Work Project of China (No. 2014FY110200A08)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ybqi@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 王茵茵 (1993—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事资源环境监测与评价研究。E-mail: wangyinyinwy@163.com

收稿日期: 2015—08—17; 收到修改稿日期: 2015—10—23

了一种递归偏最小二乘算法来保持模型的预测能力，有研究^[15-16]利用逐步线性回归方法对这些变量进行筛选。本文利用随机森林（random forest, RF）算法预测所产生的袋外误差的大小对变量进行筛选。RF算法是一种基于多决策树的方法，其在处理多元非线性数据等方面表现出很好的优势，相比较于其他的基于多元统计的土壤属性预测方法，RF算法具有防止过拟合，模型的稳定性强以及易于处理非线性回归等特点^[17]。目前RF算法在医学、管理学、经济学等诸多领域得到广泛应用，而其在地学指标预测因子筛选方面的研究相对较少。

遥感数据记录着地表覆被信息，表层土壤属性如有机质含量的差异可从反射光谱特征加以区分，因此利用遥感影像进行土壤属性含量及其空间分布的反演与制图成为可能。20世纪70年代起陆续有学者展开土壤有机质的遥感反演研究，并在其可行性、模型建立及精度验证等方面取得了一定的成果。如Peng等^[18]利用遥感数据分析了裸露土壤区域的排水模式，Sullivan等^[19]用伊科诺斯（IKONOS）数据预测亚拉巴马州中两种地貌的土壤表面属性，Simbahan等^[20]利用多源遥感二次数据进行精细分辨率的土壤有机碳制图，Selige等^[21]利用高光谱数据进行农田耕作层土壤的制图，这些研究的预测精度由于加入了环境辅助变量而有所提高^[22]。研究证明，影像分辨率是影响土壤属性预测精度的主要因素之一，选择合适分辨率的影像可以节约成本、减少数据处理量、捕捉重要的景观特点。而以往的研究少有基于不同分辨率的遥感数据对预测精度影响的评估，针对不同地形地貌区有机质分布的影响因子的探索亦不多见。

榆阳区位于陕北毛乌素沙漠与黄土高原过渡地带，是我国荒漠化最为严重的区域之一，同时也是开展植被恢复工作较早的地区。有机质在植被与土壤间的转化是影响退化生态系统逆转的关键因素，因此在本区域开展表层土壤有机质含量的预测也是荒漠化植被恢复效益监测的重要途径之一。本文利用遥感数据提取辅助环境因子，在三个空间分辨率（30 m、56 m和250 m）级别下结合RF算法对表层土壤有机质进行空间预测，并比较其在风沙滩地和黄土丘陵区预测精度，以期为荒漠化植被恢复及农业生产管理措施的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市榆阳区，属于中温带半干旱大陆性季风气候，年平均气温8.1℃，年平均降雨量412.2 mm，年平均日照总时数2 925.5 h，日照率66%。风沙滩地区分布于38°12′54″~38°29′3″N，109°12′16″~109°33′7″E，面积914 km²，平均海拔1 187 m，地形坡度较小。地表主要为固定沙丘和半固定沙丘，通过在固定沙地上营造护田林网，在流动沙地上采取营造人工林，并在沙漠化边缘营建防风阻沙林带的方法，风沙滩地区的植被得到一定的恢复，为土壤有机质的储存创造了良好条件。黄土丘陵区分布在37°57′44″~38°13′52″N，109°52′28″~110°8′48″E，面积574 km²，该区地形坡度大、沟壑纵横，平均海拔892 m，水土保持措施以种植人工刺槐林、柠条林和自然撂荒为主，表层SOM不易储存，100~400 cm间的土壤有机质储量高。

1.2 样品采集与分析

本研究样品采集时结合全国耕地地力调查与评价工作进行。于2006年10—11月间，按照随机性、均匀性及代表性原则在研究区共设置表层采样点324个（图1），其中107个分布在风沙滩地区（图1中标记为A），217个分布在黄土丘陵区（图1中标记为B）。每个样点采集0~20 cm深度土壤，在25 m×25 m范围内由4角及中心采集5个土样混合成1 kg土样，装入自封袋带回实验室自然风干过筛备用。土壤有机质的测定采用油浴加热重铬酸钾氧化—容量法进行测定，分析方法按照文献[1]进行。

1.3 遥感影像处理与植被指数提取

本文应用专题制图仪（thematic mapper, TM）、先进宽视场传感器（advanced wide field sensor, AWIFS）和中等分辨率成像仪（moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS）影像数据。植被指数与地表生物量相对应，在研究区4—11月为植被生长期，因此采用了同年从4月—11月可获取的植被指数之和来代替单一日期的植被指数。TM数据为2006年4月19日、9月10日、10月12日和10月28日在Landsat5卫星平台上获取的多波段数据（绿波段：0.52~0.60 μm；红波段：

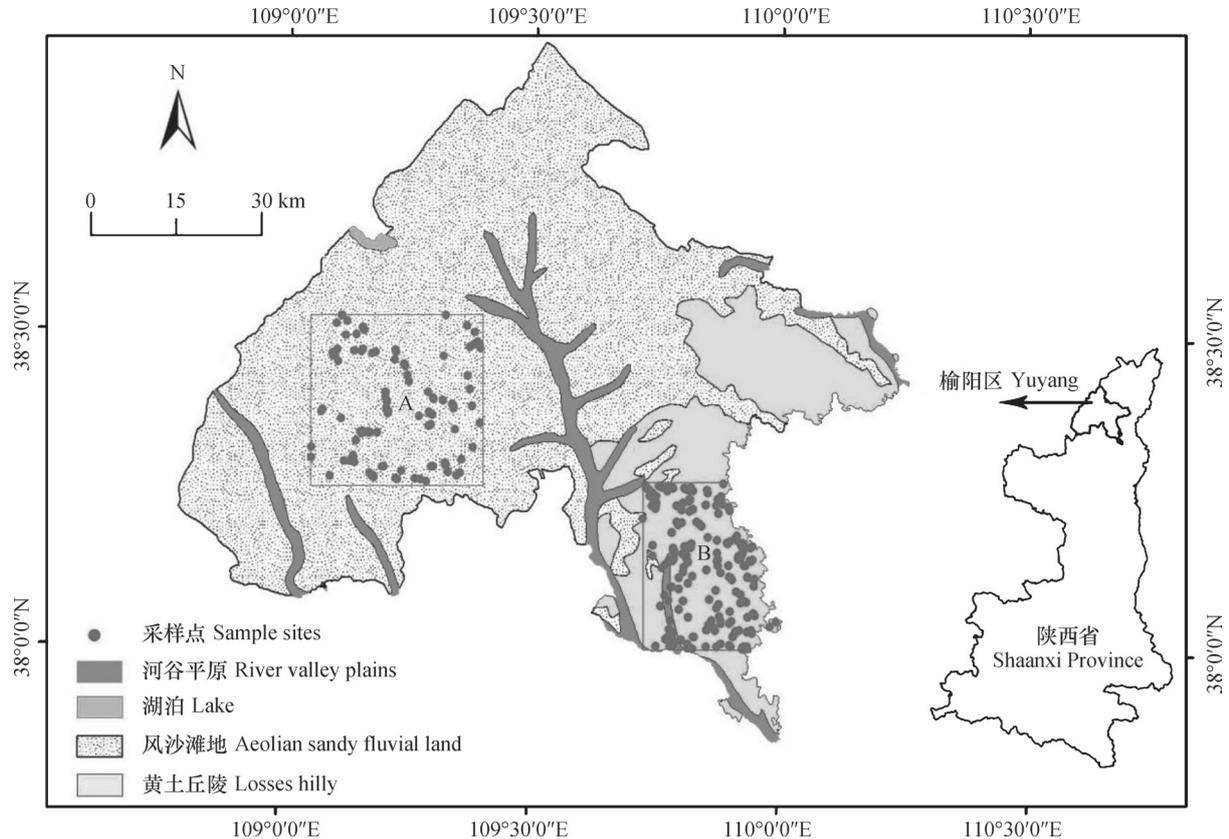


图1 研究区概况

Fig.1 General information of the study area

0.63 ~ 0.69 μm ; 近红外波段: 0.76 ~ 0.90 μm ; 短波红外: 1.55 ~ 1.75 μm), 分辨率为30m; AWIFS为2006年5月15日、9月17日、10月1日和10月10日在IRS-P6卫星平台上获取的多波段数据(绿波段: 0.52 ~ 0.59 μm ; 红波段: 0.62 ~ 0.68 μm ; 近红外波段: 0.77 ~ 0.86 μm ; 短波红外: 1.55 ~ 1.70 μm), 分辨率为56m, 其中10月10日的影像图覆盖榆阳区风沙滩地区的大部分, 在黄土丘陵区无覆盖; MODIS为2006年5月15日、6月8日、9月17日、10月11日和10月28日在Terra卫星上获取的多波段数据(绿波段: 0.54 ~ 0.56 μm ; 红波段: 0.62 ~ 0.67 μm ; 近红外波段: 0.84 ~ 0.87 μm ; 短波红外: 1.62 ~ 1.65 μm), 其中红波段和近红外波段的分辨率是250 m, 绿波段和短波红外波段的分辨率是500 m, 为了保持分辨率的一致, 500 m的绿波段和短波红外波段被重采样到250 m。影像的投影及辐射校正等预处理在ENVI5.0下进行。植被指数是表征土壤有机质含量的重要指标, 本研究利用遥感影像提取4个植被指数指标(表1), 植被指数以传感器为类别在不同日期进行求和用于土壤有

机质的预测。

1.4 基于ASTER GDEM的地形因子获取

ASTER GDEM来源于地理空间数据云平台, 其数字高程模型(DEM)的水平方向分辨率为30 m, 坡度(Slope)通过ArcGIS10计算。高程和坡度分别重采样到56 m和250 m以与植被指数数据的分辨率相一致。

研究区位于干旱半干旱区, 有机质的分布与水源地和地理位置相关, 采样点离主要河流的距离(distance to river, RD)和采样点的地理坐标(x和y)为影响有机质预测的因素; 在黄土丘陵区, 土壤大部分为黄绵土, 土壤类型(soil type, ST)不作为影响有机质分布的决定因素。

1.5 变量筛选

影响土壤有机质的因素众多, 在所有的因子中由于重要性较低而对有机质的预测产生累积误差的因子需要剔除。RF模型的袋外误差(out of bag error, OOB error)是对预测误差的无偏估计, 对于回归问题, 误差是残差的平方^[27], 依据逐次剔除因子后袋外误差的增减判断该因子是否保留,

表1 植被指数计算公式

Table 1 Formulas of vegetation indices

植被指数 Vegetation indices	公式 Formulas	参考文献 References
比值植被指数 Ratio vegetation index (RVI)	$\frac{NIR}{red}$	Cohen [23]
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	$\frac{NIR - red}{NIR + red}$	Rouse 等 [24]
简化比值植被指数 Reduced simple ratio (RSR)	$\frac{NIR}{red} \left(1 - \frac{SWIR - SWIR_{min}}{SWIR_{max} - SWIR_{min}} \right)$	Brown等 [25]
转换植被指数 Transformed vegetation index (TVI)	$\left(\frac{NIR - red}{NIR + red} + 0.5 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100$	Nellis和Briggs [26]

注：NIR，近红外波段；red，红波段；SWIR，短波红外波段；SWIR_{min}，短波红外波段的最小值；SWIR_{max}，短波红外波段的
最大值 Note: NIR, near infrared band; red, red band; SWIR, shortwave infrared band; SWIR_{min}, the minimum value of shortwave
infrared band; SWIR_{max}, the maximum value of shortwave infrared band

表2 不同空间分辨率数据下的因子筛选

Table 2 Screening of factors relative to spatial resolution of data

研究区 Study areas	因子 Factors	袋外误差 OOB errors	因子是否保留 Factors deleted or not	研究区 Study areas	因子 Factors	袋外误差 OOB errors	因子是否保留 Factors deleted or not	研究区 Study areas	因子 Factors	袋外误差 OOB errors	因子是否保留 Factors deleted or not
A _{TM}	ND	4.48		A _{AWIFS}	ND	3.82		A _{MODIS}	ND	4.64	
	x	4.35	×		x	3.82	×		x	4.57	×
	RVI	4.24	×		TVI	3.79	×		Slope	4.51	×
	TVI	4.12	×		RSR	3.71	×		RSR	4.47	×
	ST	3.98	×		ST	3.63	×		TVI	4.38	×
	NDVI	3.95	×		Slope	<u>3.52</u>	×		RVI	4.37	×
	Slope	3.89	×		y	3.66	√		ST	4.34	×
	y	<u>3.82</u>	×		RD	3.74	√		y	<u>4.23</u>	×
	RD	4.33	√		DEM	3.89	√		RD	4.64	√
	RSR	4.68	√		RVI	3.57	√		NDVI	4.55	√
DEM	4.39	√	NDVI	3.6	√	DEM	5.16	√			
B _{TM}	ND	3.62		B _{AWIFS}	ND	3.72		B _{MODIS}	ND	3.55	
	RVI	3.54	×		RVI	<u>3.63</u>	×		RVI	3.47	×
	TVI	3.45	×		RD	3.66	√		TVI	<u>3.46</u>	×
	NDVI	<u>3.31</u>	×		Slope	3.68	√		RSR	3.5	√
	Slope	3.41	√		NDVI	3.64	√		RD	3.54	√
	RD	3.41	√		TVI	3.65	√		Slope	3.5	√
	RSR	3.88	√		RSR	3.68	√		NDVI	3.58	√
	x	3.57	√		y	3.85	√		x	3.57	√
	y	3.61	√		x	3.88	√		y	3.56	√
	DEM	3.36	√		DEM	3.86	√		DEM	3.64	√

注：带下划线的数据是最后保留的所有因子进行RF预测时所产生的袋外误差值。A_{TM}为TM数据中的A区域（风沙滩地）；A_{AWIFS}为AWIFS数据中的A区域；A_{MODIS}为MODIS数据中的A区域；B_{TM}为TM数据中的B区域（黄土丘陵区）；B_{AWIFS}为AIWFS数据下的B区域；B_{MODIS}为MODIS数据中的B区域。ND，未删；x，经度值；y，纬度值；RVI，比值植被指数；TVI，转换植被指数；NDVI，归一化植被指数；RSR，简化比值植被指数；DEM，高程值；Slope，坡度值；RD，离河流的距离。下同 Note: Underlined data are out of bag errors of factors remained in RF prediction. A_{TM} stands for area A (Aeolian sandy fluvial land) of TM data. A_{AWIFS} is area A of AWIFS data; A_{MODIS} is area A of MODIS data; B_{TM} is area B (Losses hilly) of TM data; B_{AWIFS} is area B of A_{IWFS} data; B_{MODIS} is area B of MODIS data.OOB error, out of bag error; ND, non deletion; x, longitude value; y, latitude value; RVI, ratio vegetation index; TVI, transformed vegetation index; NDVI, normalized vegetation index; RSR, reduced simple ratio vegetation index; DEM, elevation value; Slope, slope value; RD, the distance to rivers. The same below

袋外误差增加则删掉该因子,反之则保留,从而实现RF模型的因子筛选(表2)。

1.6 RF模型参数设定

本研究以上述所选变量为基础,运用RF模型进行三种分辨率下土壤有机质含量的回归预测。RF模型是建立在决策树基础上,通过多次bootstrap抽样获得多个随机样本,并通过这些样本分别建立相对应的决策树,从而构成随机森林。

对于回归问题,取所有决策树预测结果的均值作为最终的预测结果^[27]。RF模型建立的过程中涉及到2个关键的参数:ntree和mtry。ntree为决策树的数量,即使用bootstrap重抽样的次数;mtry为每次树模型重建时节点分裂的次数。这两个参数的设定同样依据RF模型运算时产生的袋外误差的大小,本文RF预测设定ntree为1000,mtry为2(表3)。

表3 不同空间分辨率数据下的决策树数量(ntree)和节点分裂次数(mtry)的筛选

研究区 Study areas	决策树数量 ntree	节点分裂次数 mtry	袋外误差 out of bag error	研究区 Study areas	决策树数量 ntree	节点分裂次数 mtry	袋外误差 out of bag error
A _{TM}	1000	2	3.82	B _{TM}	1000	2	3.31
	2000	2	3.88		2000	2	3.36
	1000	3	3.92		1000	3	3.43
A _{AWIFS}	1000	2	3.52	B _{AWIFS}	1000	2	3.63
	2000	2	3.58		2000	2	3.67
	1000	3	3.66		1000	3	3.67
A _{MODIS}	1000	2	4.23	B _{MODIS}	1000	2	3.46
	2000	2	4.34		2000	2	3.52
	1000	3	4.43		1000	3	3.58

2 结果与讨论

2.1 土壤有机质含量空间分布

通过R语言的random forest包,设定RF模型的ntree为1000,mtry为2,根据所筛选的因子,在TM(30 m)、AWIFS(56 m)和MODIS(250 m)的空间分辨率下分别在风沙滩地区(A)和黄土丘陵区(B)对土壤有机质进行预测,使用ArcGIS 10进行基于RF模型的不同空间分辨率下的土壤有机质预测结果的空间分布制图(图2)。

从图2可以看出,风沙滩地区的土壤有机质在整体水平高于黄土丘陵区,大部分区域的土壤有机质含量高于8 g kg⁻¹,该区为荒漠化土壤的主要分布区。受退耕还林还草工程的影响,大面积的流动沙地已经转变为半固定或固定沙地,表层结皮明显,有机质在表层聚集,因此表层土壤有机质含量较高。黄土丘陵区的土壤类型以黄绵土为主,受水土流失及耕作的影响,土壤有机质含量较低,大部分有机质含量低于9 g kg⁻¹。基于TM数据预测的土

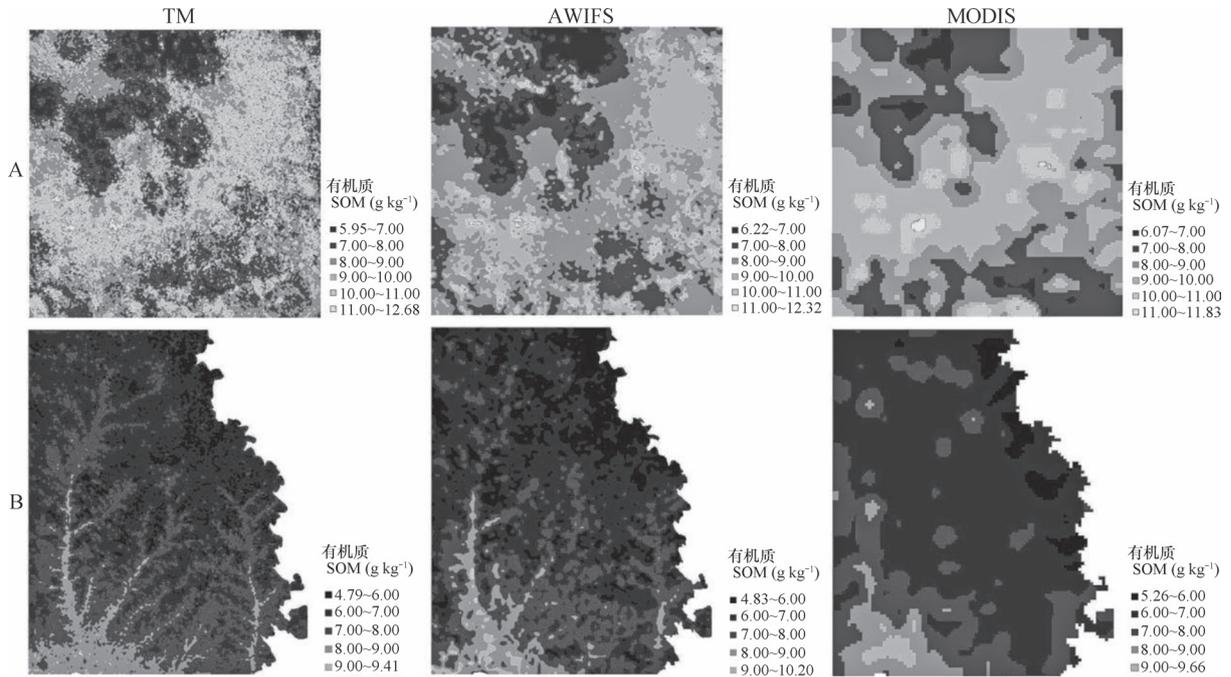
壤有机质的空间分布在风沙滩地区比较离散,在黄土丘陵区则以河谷为中心由高到低呈渐变型分布。基于AWIFS数据预测的土壤有机质空间分布趋势与TM数据在总体上一致,但其在风沙滩地区>10 g kg⁻¹的有机质分布面积较TM数据预测的面积小。基于MODIS数据的土壤有机质预测结果最为粗略,在黄土丘陵区有机质沿河谷的狭长型分布形态已简化为点面状。

2.2 土壤有机质预测结果评估

分析分辨率对预测结果的影响,首先用图像的熵值来衡量土壤有机质预测结果图所含的信息量的大小(表4),熵值越大,图像中所包含的信息量越大,表明有机质预测图中的细节信息越多;反之,熵值越小,有机质预测图中的细节信息越少。图像熵值的计算公式如下:

$$E = - \sum_{i=1}^{L-1} p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

式中, E 为图像总的信息熵, i 为像元的灰度值, L



注：A：风沙滩地区，B：黄土丘陵区；TM代表基于TM数据的有机质预测图，AWIFS数据代表基于AWIFS数据的有机质预测图，MODIS代表基于MODIS数据的有机质预测图 Note: A: Aeolian sandy fluvial land, B: Losses hilly; TM, AWIFS and MODIS represent soil organic matter prediction maps based TM data, AWIFS data and MODIS data, respectively

图2 土壤有机质预测结果对比图

Fig. 2 Comparison of soil organic matter prediction map

为图像的总像元数量， p_i 是像元值为*i*的像元数量与总的像元数量的比值。

表4 土壤有机质预测结果的熵值对比

Table 4 Comparison of SOM predictions in entropy

研究区Study area	TM	AWIFS	MODIS
风沙滩地区 (A) Aeolian sandy fluvial land (A)	2.19	1.33	0.3
黄土丘陵区 (B) Loess hilly (B)	1.81	1.11	0.26

由表4可知，遥感影像空间分辨率越高，土壤有机质空间预测图中包含的信息量越大。其中，在风沙滩地区基于TM数据的有机质预测图的熵值最大，在黄土丘陵区基于MODIS数据的熵值最小。为了进一步评估不同地貌区基于RF模型预测的土壤有机质精度，采用平均误差（mean error, ME）、绝对平均误差（mean absolute error, MAE）、均方根误差（root mean square error, RMSE）和皮尔逊相关系数（*R*）来计算研究区土壤有机质预测值和实测值的偏差和一致性^[28]，同时，使用变量对预测结果的可解释度（variance explainability, VE）来说明不同分辨率数据下的RF模型对土壤有

机质空间变异的解释程度^[27]。

RF模型的每棵分类树，均是对原始记录进行有放回的重抽样后生成的。没有被抽取的记录自然形成一个对照集。所以随机森林不需要另外预留部分数据做交叉验证，其本身的算法类似交叉验证^[27]。为了说明随机抽样对有机质预测精度的影响，调整训练数据和验证数据在总数数据量中所占的百分比，根据不同抽样百分比中预测值和实测值的偏差和一致性来分析在不同分辨率条件下土壤有机质预测的精度（表5）。表5中：在风沙滩地区，基于AWIFS数据的RF模型解释土壤有机质空间变异的能力最强，训练数据集中预测值和实测值的相关系数最高达0.95，验证数据集中预测值和实测值的相关系数可达0.67；三个分辨率下的遥感数据的预测结果表明，训练集为总数数据集的80%，验证集中预测值与实测值的偏差最小。在黄土丘陵区，基于TM数据的模型预测能力最强，训练集和验证集中预测值和实测值的相关系数分别达到0.96和0.71，训练集为总数数据集的60%，验证集中预测值与实测值的偏差最小；基于AWIFS和MODIS数据的预测结果表明，训练集为总数数据集的80%，验证集中

表5 土壤有机质预测精度对比

Table 5 Comparison of SOM prediction in accuracy

研究区 Study area	VE (%)	训练集占总数的百分比					验证集占总数的百分比				
		Percentage of the training set against the total					Percentage of the validation set against the total				
		%	R	ME	MAE	RMSE	%	R	ME	MAE	RMSE
A _{TM}	24.14	80%	0.95	0	0.69	0.9	20%	0.60	-0.54	1.57	1.8
		70%	0.95	0.01	0.66	0.86	30%	0.47	-0.76	1.8	2.24
		60%	0.95	0.03	0.69	0.85	40%	0.39	0.38	1.78	2.07
		50%	0.95	0.02	0.73	0.95	50%	0.41	-0.27	1.64	2
A _{AWIFS}	30.11	80%	0.95	0	0.68	0.87	20%	0.67	-0.95	1.46	1.94
		70%	0.94	-0.01	0.66	0.88	30%	0.29	1.03	2.08	2.44
		60%	0.95	-0.02	0.65	0.83	40%	0.40	0.13	1.84	2.31
		50%	0.94	-0.02	0.71	0.93	50%	0.45	0.08	1.76	2.11
A _{MODIS}	15.96	80%	0.94	-0.01	0.76	0.98	20%	0.60	-0.12	1.53	1.8
		70%	0.93	-0.01	0.81	1	30%	0.58	-0.76	1.62	2.2
		60%	0.95	0.02	0.73	0.9	40%	0.41	-0.57	1.74	2.17
		50%	0.94	-0.02	0.78	1	50%	0.25	-0.01	1.74	2.12
B _{TM}	44	80%	0.96	0.01	0.58	0.8	20%	0.65	-0.04	1.57	1.97
		70%	0.95	0.01	0.66	0.88	30%	0.70	0.34	1.42	1.86
		60%	0.96	0.01	0.65	0.88	40%	0.71	-0.08	1.31	1.74
		50%	0.96	0.01	0.58	0.76	50%	0.60	0.23	1.43	2
B _{AWIFS}	38.65	80%	0.96	0.02	0.63	0.86	20%	0.67	0.04	1.47	1.78
		70%	0.96	0.004	0.68	0.9	30%	0.52	-0.08	1.38	1.75
		60%	0.96	0.01	0.65	0.86	40%	0.61	0.14	1.56	1.97
		50%	0.96	0	0.67	0.86	50%	0.59	0.23	1.45	1.94
B _{MODIS}	40.06	80%	0.95	0.01	0.68	0.9	20%	0.72	0.16	1.27	1.58
		70%	0.96	0.02	0.6	0.82	30%	0.69	-0.02	1.56	1.98
		60%	0.95	0.01	0.68	0.89	40%	0.69	0.43	1.51	1.89
		50%	0.95	0.01	0.65	0.88	50%	0.64	-0.3	1.48	1.95

注：VE，变量对预测结果的可解释度；ME，平均误差；MAE，绝对平均误差；RMSE，均方根误差；R，皮尔逊相关系数
 Note: VE, Variance explainability for prediction results; ME, mean error; MAE, mean absolute error; RMSE, root mean square error; R, Pearson correlation coefficient

预测值与实测值的偏差最小。基于TM、AWIFS和MODIS数据的RF模型解释黄土丘陵区土壤有机质空间变异的百分比（38.65%~44%）均较风沙滩地区（15.96%~30.11%）要高，说明RF模型更适宜在地貌复杂的地区进行预测。基于上述判断，作出榆阳区黄土丘陵和大部分风沙滩地的土壤有机质分布图（图3）。

2.3 影响土壤有机质分布的主要环境变量

RF模型的预测过程中，参与模型预测的环境

变量对土壤有机质的重要性在不同条件下会发生改变。RF模型依据在每一棵决策树中变量加入随机噪声后袋外误差的增减判别该变量是否重要，误差增加，则该变量比较重要，反之则不重要。变量的重要性 = $\sum (\text{加入噪声后的袋外误差} - \text{原始的袋外误差}) / n_{\text{tree}}$ 。在TM、AWIFS和MODIS数据的分辨率下对风沙滩地区和黄土丘陵区不同环境变量进行相对重要性排序（表6），判别影响土壤有机质分布的主要环境变量。同时，通过有机质与环境变

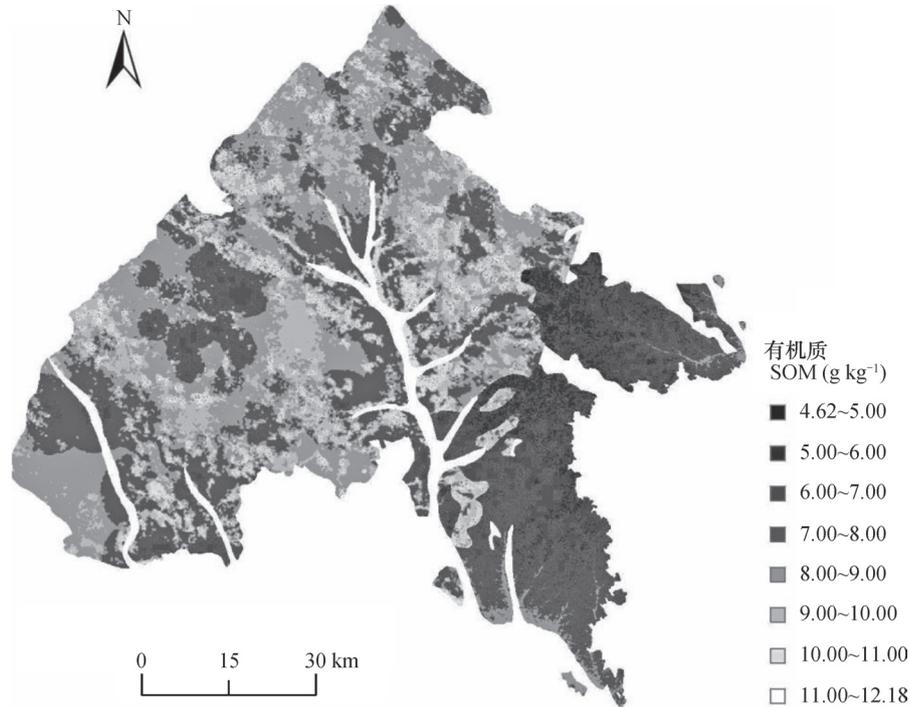


图3 榆阳区土壤有机质分布图（不包括河谷平原区和无数据地区）

Fig. 3 Soil organic matter distribution map of Yuyang (River valley plains and no data areas excluded)

表6 RF模型中变量对土壤有机质预测的相对重要性排序

Table 6 Sequence of variables used in the RF model for predicting soil organic matter in relative importance

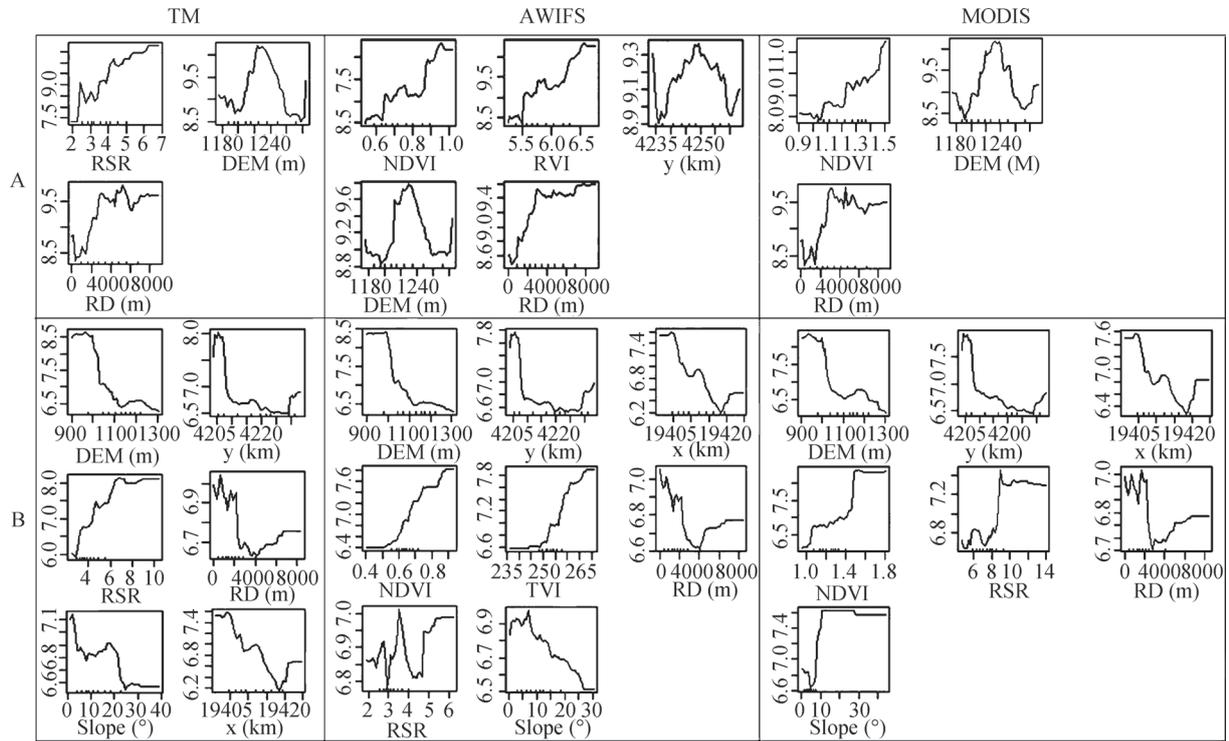
研究区Study area	A _{TM}	A _{AWIFS}	A _{MODIS}	B _{TM}	B _{AWIFS}	B _{MODIS}
相对重要性排序值	RSR (22.69)	RVI (23.04)	NDVI (22.40)	DEM (30.17)	DEM (28.22)	DEM (30.19)
Sequence of relative importance	DEM (18.15)	NDVI (21.71)	DEM (22.32)	y (27.38)	y (22.41)	y (25.04)
	RD (11.82)	DEM (16.29)	RD (14.45)	x (24.94)	x (22.16)	x (23.10)
		RD (10.60)		RSR (24.60)	NDVI (13.40)	NDVI (22.34)
		y (6.47)		RD (10.47)	TVI (13.02)	RSR (13.38)
				Slope (5.33)	RD (9.34)	RD (10.29)
					RSR (8.74)	Slope (4.29)
					Slope (-0.26)	

注：括号中的数字代表因子的重要性排序值 Note: The value in parentheses stands for relative importance of factors

量的局部依赖性图，划分主要环境变量对土壤有机质的具体影响范围（图4）。

在风沙滩地区：（1）植被提供枯枝落叶，累积腐殖质，是影响土壤有机质分布的首要因素，与有机质含量总体呈正相关关系。其中RSR（TM数据）在土壤有机质大于 7.5 g kg^{-1} 时有影响，NDVI和RVI（AWIFS数据）在有机质大于 8.5 g kg^{-1} 时有影响，NDVI（MODIS数据）在有机质大于 8 g kg^{-1} 时有影响。（2）高程（DEM）是影响土壤

有机质的次要因素。风沙滩地以固定和半固定沙丘为主，沙丘的顶部和底部沙子的流动性较强，有机质含量低，在高程为 $1\ 200 \sim 1\ 260\text{m}$ 有机质变化较大， $1\ 220 \text{ m}$ 左右达到最高。（3）离水源地的距离（RD）是第三重要的影响因素。在沙丘地区，水源的分布影响植被的分布，但分布离散，面积较小，对土壤有机质的影响范围大多低于 500 m 。（4）地理位置（y）对土壤有机质的影响最小，其影响趋势与高程保持一致，仅在土壤有机质为



注：图中纵坐标为有机质SOM (g kg^{-1}) 值，横坐标为不同的变量：x为经度值；y为纬度值；RVI为比值植被指数；TVI为转换植被指数；NDVI为归一化植被指数；RSR为简化比值植被指数；DEM为高程值；Slope为坡度值；RD为离河流的距离。A：风沙滩地；B：黄土丘陵区 Note: Values on y-axis are soil organic matter (g kg^{-1}), and on x-axis are variables; x is longitude value; y is latitude value; RVI is ratio vegetation index; TVI is transformed vegetation index; NDVI is normalized vegetation index; RSR is reduced simple ratio vegetation index; DEM is elevation value; Slope is slope value; RD is the distance to rivers. A: Aeolian sandy fluvial land; B: Losses hilly

图4 各变量对土壤有机质预测的影响范围

Fig.4 Ranges of the effects of various variables on soil organic matter prediction

8.9 ~ 9.3 g kg^{-1} 有影响。

在黄土丘陵区：（1）高程是影响土壤有机质分布的首要的因素，其与有机质含量呈负相关关系。黄土丘陵地区沟壑纵横，高海拔处水土流失相对明显，有机质不易储存。（2）地理位置（x和y）是影响土壤有机质的次要因素，有机质含量由西南河谷平原向东北丘陵方向降低。（3）植被是第三重要的影响因素，与土壤有机质含量呈正相关关系。黄土丘陵的植被生长受水土流失制约较大。RSR（TM数据）、NDVI和TVI（AWIFS数据）与有机质含量的相关曲线比MODIS数据的植被指数更接近对角线，三种数据的植被指数在小于8 g kg^{-1} 对有机质有影响。（4）离水源地距离（RD）对土壤有机质的影响比植被弱，但要高于坡度对有机质的影响。黄土丘陵区河流对土壤有机质的影响范围为4 000 m左右。（5）由于采样

地点大部分位于缓坡，因此坡度（Slope）对土壤有机质的影响最小，与有机质大致呈负相关关系（MODIS数据的坡度与TM和AWIFS数据相比出现一定误差）。

有机质含量与环境因子之间的关系是非线性的，RF模型能够很好地模拟这种关系，与其他方法相比有一定的优越性（如逐步线性回归模型、广义加性混合模型和分类—回归树模型）^[29]。由于在干旱半干旱区使用RF模型进行土壤有机质预测的有关研究较少，本文与Wiesmeier等^[30]在中国内蒙古草场区域通过RF模型进行土壤有机碳的预测结果进行比较。Wiesmeier等的研究中共有120个随机采样点，RF模型的变量可解释度为61.9%，验证数据集中有机碳预测值和实测值的相关系数为0.74，土壤有机碳的预测结果较好，可作为本文有机质预测结果的参考。

3 结 论

本文通过RF模型，基于TM（30 m）、AWIFS（56 m）和MODIS（250 m）等遥感数据，在榆阳区的风沙滩地区和黄土丘陵区，选择影响土壤有机质分布的主要环境变量，通过RF模型的袋外误差进行变量筛选，实现了对榆阳区不同地貌类型区的土壤有机质空间分布预测。主要结论如下：1）在三个分辨率下，黄土丘陵区的土壤有机质预测的精度均高于风沙滩地区，说明RF模型在地貌复杂的地区作预测更有效。2）TM数据在黄土丘陵区的土壤有机质的预测结果较其他分辨率的数据好，说明在地貌复杂的地区，预测精度与数据的分辨率呈正相关；AWIFS数据在风沙滩地区的土壤有机质预测结果比其他数据好，说明在地貌相对简单的地区，可以用较低分辨率的数据代替较高分辨率的数据。3）在黄土丘陵区，影响土壤有机质预测的最重要的三个因素依次是高程、地理位置和植被。在风沙滩地区，影响土壤有机质预测的最重要的三个因素依次是植被、高程和离水源地的距离。植被对土壤有机质的影响在风沙滩地比黄土丘陵区要大。

参 考 文 献

- [1] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [2] Dick R P. A review: Long-term effects of agricultural systems on soilbiochemical and microbial parameters. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1992, 40 (1/4): 25—36
- [3] Pepper I L. *Pollution science*. New York, USA: Academic Press, 1996
- [4] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. *土壤学报*, 2013, 50 (1): 1—11
Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 1—11
- [5] 韩丹, 程先富, 谢金红, 等. 大别山区江子河流域土壤有机质的空间变异及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49 (2): 403—408
Han D, Cheng X F, Xie J H, et al. Spatial variability of soil organic matter in Jiangzhe watershed of Dabie mountainous area and its influence factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (2): 403—408
- [6] 巫振富, 赵彦锋, 齐力, 等. 复杂景观区土壤有机质预测模型的尺度效应. *土壤学报*, 2013, 50 (2): 296—305
Wu Z F, Zhao Y F, Qi L, et al. Effect of scale of model on prediction of soil organic matter in complex landscape region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (2): 296—305
- [7] 张楚天, 杨勇, 贺立源, 等. 基于环境因子和联合概率方法的土壤有机质空间预测. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 666—673
Zhang C T, Yang Y, He L Y, et al. Prediction of spatial distribution of soil organic matter based on environmental factors and a joint probability method (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 666—673
- [8] 沈润平, 丁国香, 魏国栓, 等. 基于人工神经网络的土壤有机质含量高光谱反演. *土壤学报*, 2009, 46 (3): 391—397
Shen R P, Ding G X, Wei G S, et al. Retrieval of soil organic matter content from hyper-spectrum based on ANN (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (3): 391—397
- [9] 王淼, 潘贤章, 解宪丽, 等. 土壤含水量对反射光谱法预测红壤土壤有机质的影响研究. *土壤学报*, 2012, 44 (4): 645—651
Wang M, Pan X Z, Xie X L, et al. Effects of soil moisture on determining red soil organic matter using VIS-NIR diffuse reflectance spectroscopy (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 44 (4): 645—651
- [10] Jenny H. *The soil resource-Origin and behavior*. New York: Springer-Verlag, 1980
- [11] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测. *土壤学报*, 2008, 45 (4): 577—584
Lian G, Guo X D, Fu B J, et al. Spatial variability and prediction of soil nutrients on a county scale on the Loess Plateau—A case study of Hengshan County, Shaanxi Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (4): 577—584
- [12] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49 (1): 68—76
Liu W, Cheng J M, Gao Y, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influence factors (In Chinese). *Acta Pedologica*

- Sinica, 2012, 49 (1) : 68—76
- [13] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 小流域土壤有机碳密度空间变异特征的尺度效应研究. 土壤, 2014, 46 (5) : 787—792
- Li L, Yao Y F, Qin F C, et al. Scale-dependency of spatial variability of soil organic carbon density in small watershed (In Chinese). Soils, 2014, 46 (5) : 787—792
- [14] Di Nezio M S, Pistonesi M F, Fragoso W D, et al. Successive projections algorithm improving the multivariate simultaneous direct spectrophotometric determination of five phenolic compounds in sea water. Microchemical Journal, 2007, 85 (2) : 194—200
- [15] 刘二永, 刘健, 余坤勇, 等. 基于环境因子和R-STPS的林地土壤有机质预测模型. 农业机械学报, 2015, 46 (1) : 133—137
- Liu E Y, Liu J, Yu K Y, et al. Spatial prediction of forest soil organic matter based on environmental factors and R-STPS interpolation methods (In Chinese). Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46 (1) : 133—137
- [16] 张娟娟, 熊淑萍, 时雷, 等. 基于近红外光谱分析的土壤全氮含量估测研究. 土壤, 2015, 47 (4) : 653—657
- Zhang J J, Xiong S P, Shi L, et al. Soil nitrogen content prediction with near infrared spectroscopy (In Chinese). Soils, 2015, 47 (4) : 653—657
- [17] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述. 统计与信息论坛, 2011, 26 (3) : 32—37
- Fang K N, Wu J B, Zhu J P, et al. The review of random forest (In Chinese). Statistics and Information Forum, 2011, 26 (3) : 32—37
- [18] Peng W, Wheeler D B, Bell J C, et al. Delineating patterns of soil drainage class on bare soils using remote sensing analyses. Geoderma, 2003, 115 (3/4) : 261—279
- [19] Sullivan D G, Shaw J N, Rickman D. IKONOS imagery to estimate surface soil property variability in two Alabama physiographies. Soil Science Society of American Journal, 2005, 69 (6) : 1789—1798
- [20] Simbahan G C, Dobermann A, Goovaerts P, et al. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data. Geoderma, 2006, 132 (3/4) : 471—489
- [21] Selige T, Böhner J, Schmidhalter U. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures. Geoderma, 2006, 136 (1/2) : 235—244
- [22] Rivero R G, Grunwald S, Bruland G L. Incorporation of spectral data into multivariate geostatistical models to map soil phosphorus variability in a Florida wetland. Geoderma, 2007, 140 (4) : 428—443
- [23] Cohen W B. Response of vegetation indices to changes in threemeasures of leaf water stress. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57 (2) : 195—202
- [24] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1973, NASA SP-351: 309—317
- [25] Brown L, Chen J M, Leblanc S G, et al. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. Remote Sensing of Environment, 2000, 71 (1) : 16—25
- [26] Nellis M D, Briggs J M. Transformed vegetation index for measuring spatial variation in drought impacted biomass on Konza Prairie, Kansas. Transactions of the Kansas Academy of Science, 1992, 95 (1/2) : 93—99
- [27] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45 (1) : 5—32
- [28] Stambaugh M C, Guyette R P. Predicting spatio-temporal variability in fire return intervals using a topographic roughness index. Forest Ecology and Management, 2008, 254 (3) : 463—473
- [29] 郭澎涛, 李茂芬, 罗微, 等. 基于多源环境变量和随机森林的橡胶园土壤全氮含量预测. 农业工程学报, 2015, 31 (5) : 194—202
- Guo P T, Li M F, Luo W, et al. Prediction of soil total nitrogen for rubber plantation at regional scale based on environmental variables and random forest approach (In Chinese). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (5) : 194—202
- [30] Wiesmeier M, Barthold F, Blank B, et al. Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. Plant and Soil, 2011, 340 (1/2) : 7—24

Prediction of Soil Organic Matter Based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm

WANG Yinyin¹ QI Yanbing^{1, 2†} CHEN Yang¹ XIE Fei¹

(¹ College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(² Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Soil organic matter is closely related with soil fertility, so the knowledge about spatial distribution of soil organic matter is conducive to rationalization of fertilization management and improvement of land use potential. As carbon source, soil organic carbon is an important factor affecting regional carbon budgeting. Remote sensing data has widely been used in digital soil mapping, which may improve accuracy of the prediction of soil properties to a certain extent. With the aeolian sandy fluvial land and loess hills in Yuyang District cited as subject, this study tried to predict soil organic content and distribution in the topsoil layer of the region of a varying resolution (30 m, 56 m and 250 m), using random forest (RF) algorithm and relevant thematic mapper (TM), advanced wide field sensor (AWIFS), moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model (ASTER GDEM) data, separately, and in addition, other various factors affecting distribution of soil organic matter, and to validate the predictions with soil samples collected from 324 sampling sites. Variables in the prediction were screened in the light of out-of-bag (OOB) errors the RF algorithm may yield. The mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and Pearson correlation coefficient (R) were used to evaluate the differences between predicted and observed values of soil organic matter relative to resolution. Entropies of the prediction, using the RF model, of distribution of soil organic matter in regions different in topography were compared. Besides, explanation of spatial variability of soil organic matter with the RF model was compared relative to resolution, and at the same time, various environmental variables in the aeolian sandy fluvial land area and loess hilly area were ranked in importance relative to resolution of the TM, AWIFS and MODIS data used, so as to identify the most important environmental variables affecting distribution of soil organic matter; and based on the partial dependence map of soil organic matter on the variables, specific range of the impacts of the main variables were delineated. Results showed that: 1) in the aeolian sand fluvial land area, the prediction using the RF model and the AWIFS data is the highest in accuracy, with OOB error being 3.52 and correlation coefficient between predicted and measured values reaching 0.67, regardless of percentage of the samples taken for validation, while in the loess hilly area, the prediction based on the TM data is the highest, with OOB error being 3.31 and correlation coefficient reaching 0.71. The prediction is better in the loess hilly area than in the aeolian sand fluvial land area, with MAE being in the range of 1.27 ~ 1.57 g kg⁻¹ in the former and in the range of 1.46 ~ 2.08 g kg⁻¹ in the latter. 2) In the aeolian sand fluvial land area, vegetation is the most important factor affecting distribution of soil organic matter, and mostly in positive relationship with soil organic matter. Among the TM data, reduced simple ratio (RSR) is the highest in effect on soil organic matter, or > 7.5 g kg⁻¹, among the AWIFS data, normalized difference vegetation green index (NDVI) and ratio vegetation index (RVI) are, or > 8.5 g kg⁻¹, and among the MODIS data, NDVI is or > 8 g kg⁻¹.

Elevation is the second one and its impact varies the most sharply when it ranges between 1 200 and 1 260 m and peaks at 1 220 m. Distance from water source is the third one. As water sources in the aeolian sandy fluvial land area are quite scattered and small in area, their impacts on soil organic matter seldom exceed 500 m. 3) In the loess hilly area, elevation is the most important factor affecting soil organic matter and negatively related to soil organic matter. Geographic location is the second one, soil organic matter declines in content from southwest to northeast in the area. Vegetation is the third one, in positive relationship with soil organic matter, but in all the three types of datasets, the impacts of vegetation indices on soil organic matter never go beyond 8 g kg^{-1} . So, it is quite obvious that in areas relatively simple in topography, it is advisable to use data relatively low in resolution instead of data high in resolution in predicting soil organic matter and the RF model is more effective in predicting in areas complex in topography.

Key words Multi-resolution remote sensing data; Random forest; Soil organic matter

(责任编辑: 陈荣府)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu (290)
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. (303)

Insights and Perspectives

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science CAI Zucong, HUANG Xinqi (310)

Research Articles

- Element Migration in S₃ Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication CHU Chunjie, ZHAO Jingbo (320)
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. (330)
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared (VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. (340)
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. (353)
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. (363)
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. (373)
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. (386)
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang (399)
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong (409)
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. (419)
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. (426)
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. (436)
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao (448)
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. (455)
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. (466)
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. (475)
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. (488)
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ZHENG Yan, JIA Zhongjun (500)
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. (508)
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. (521)
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. (531)
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. (542)

Research Notes

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. (550)
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. (559)

Cover Picture: Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation (by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：卢 萍 檀满枝 陈荣府

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008
电话：025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
电话：010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392163