

苏南农田土壤性状和水稻长势对土地整治的短期响应^{*}

李肖肖¹ 朱凤武² 许桃元² 姚新春² 余 漫¹ 陈 浮^{1†}

(1 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116)

(2 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏省土地勘测规划院, 南京 210029)

摘 要 土地整治作为一项增加耕地数量、改善农田基础设施、提高粮食产能的重要手段, 全国已广泛开展。苏南平原农田整治中坑塘填埋、田块平整等十分普遍, 这为土壤环境带来极大风险, 但目前对农田整治中短期生态干扰仍缺乏关注。本研究借助遥感和田间调查, 对土壤性状和水稻归一化植被指数开展了监测, 研究土地整治对土壤及水稻生长的短期干扰及其相互关系。结果表明: 短期内平整造成表层土壤有机质、全氮和有效锌含量显著下降, 有效硅则相反, 有效磷和速效钾变化不显著。不同平整类型区土壤养分差异明显, 由高到底依次为未动工区、填方区、坑塘填埋区和挖方区; 土地整治后, 水稻归一化植被指数 (NDVI) 呈现明显的异质性, NDVI 值由高到底依次为未动工区 0.834、填方区 0.808、坑塘填埋区 0.763 和挖方区 0.747; 土地整治区水稻 NDVI 值与有机质、全氮和有效锌含量存在极显著相关关系, R^2 分别为 0.656、0.617 和 0.625。土地平整引起的有机质、全氮和有效锌空间变异是导致水稻 NDVI 异质性的主要因素, 土地整治对土壤和水稻长势造成了短期干扰, 应当培肥土壤与强化管护, 实现由数量、产能为主整治向生态型整治转变。

关键词 土地整治; 土壤质量; 水稻长势; NDVI; 短期干扰

中图分类号 S141 **文献标识码** A

土地整治是土地利用管理的重要手段, 主要目的是增加耕地面积, 提升粮食产能^[1]。近十年, 国家每年投资数百亿资金用于土地整治, 累积完成整治面积 3 000 万 hm^2 , 为国家耕地“占补平衡”战略和粮食安全作为重要贡献^[2]。长期以来, 土地整治过分强调新增耕地和粮食产能, 导致对土地整治的环境效应关注极少^[3-4]。当前我国社会发展形势发生重大转变, 绿水青山和生态安全已成为优先目标^[5]。土地整治也应从注重数量、产能向注重生态服务转变^[6], 耕地不只是生产粮食, 更是涵养水源、净化空气、乡村旅游等多功能生态服务价

值提供者^[7]。因此, 生态型整治将是今后的主要方向。土地整治作为一个复杂工程, 在优化生产、维持农田景观功能的同时, 必然会对农田生态产生一系列影响。但当前平整工程多采用挖高填低、表土剥离等方式, 必然对土壤养分循环、微生物环境等造成大幅干扰^[8], 进而影响作物生长。

土地整治相关的环境问题已受到关注。在大尺度上学者关注土地整治的社会效应^[9]以及土地整治后农民收入增加^[10]。在项目尺度上学者关注土地整治的景观效应^[11], 可减少水土流失、增加碳储存^[12]。在小尺度上, 研究者发现, 土地整治使

^{*} 国家科技支撑计划项目 (2015BAD06B02) 和江苏省国土资源厅科技项目 (2016KJ008) 共同资助 Supported by the National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2015BAD06B02) and the Project of Department of Land and Resources of Jiangsu Province (No. 2016KJ008)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenfu@cumt.edu.cn

作者简介: 李肖肖 (1995—), 女, 河南封丘人, 硕士研究生, 主要从事土地整治及生态监测研究。E-mail: lixiaoxiao@cumt.edu.cn

收稿日期: 2018-06-19; 收到修改稿日期: 2018-09-16; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-11-23

得土壤性状发生了较大的改变^[13-14]；Hazeu等^[15]利用归一化植被指数（NDVI）监测农田变化，识别高价值农田；Brye等^[14]研究发现土地整治对土壤理化性质造成区域性不平衡现象，但随着时间的增加，不平衡现象逐渐减小。各地农田质量监测表明，整治增加了土壤养分的异质性^[16]，造成土壤pH、盐分和氮磷钾等不同程度的空间变异^[14, 17]，同时也对农田生态系统带来负面影响^[18]。

中国土地整治已经历多阶段发展。最初是为了新增耕地，满足耕地占补平衡需求。2006年后转向高标准基本农田建设，关注粮食产能潜力提升。2011年后转向农村土地综合整治，关注城乡统筹与包容性增长。学术界主要关注新耕地率^[19]、投资效率^[10]、产能潜力^[20]、乡村振兴^[2]以及制度设计^[1, 21]等国家宏观战略。对土地整治的微观环境效应缺乏足够监测，土地整治与土壤环境之间耦合机制研究尚不充分。当前苏南平原（江苏省南京、苏州、无锡、常州、镇江等五市）大规模开展土地整治，以减少农田破碎化、促进土地流转、推进农业现代化。但该区域水网密布、缺少土源，整治需要内部平衡土方，如坑塘填埋、路基工程，土方调配对农田土壤环境干扰极大。然而，短期内不同平整方式导致的土壤养分空间特征变化鲜有报道。因此，本研究利用遥感和田间调查技术，监测整治后填方区、挖方区、坑塘填埋区和未动工区土壤养分特征及第一生长季水稻长势，探索不同平整方式对水稻生长的短期干扰，以期为土地整治质量监测、整治后土壤培肥及生态管护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于常州市金坛区直溪镇耿庄村（31°34′~31°35′N，119°19′~119°21′E）。属亚热带季风气候，四季分明，年均降水量1 064 mm，无霜期较长，年均气温15.3℃。项目区内河塘密布项目区内河塘密布，是典型的长江三角洲平原水乡，虽垦殖历史悠久，但田块碎片化严重。研究区雨热同季，一年两熟，主要为水稻—小麦轮作。土壤类型为湖积和长江冲积母质发育的水稻土，土壤肥沃，但呈酸化趋势。

研究区土地整治前耕地39.12 hm²（水田34.48 hm²、旱地4.64 hm²）、园地0.56 hm²、交通运输用地8.23 hm²、水域及水利设施用地53.69 hm²（河流水面10.67 hm²、坑塘水面42.56 hm²、沟渠0.46 hm²）。虽属于平原，但田块小且零散，田坎多，水利设施不完善。2017年1—5月先后进行了田块平整、表土剥离、坑塘填埋、道路和水利设施工程建设，共计土地整治面积107.8 hm²，整治后耕地57.97 hm²（水田54.16 hm²、旱地3.81 hm²）、园地3.81 hm²、交通运输用地3.67 hm²、水域及水利设施用地39.95 hm²（河流水面9.69 hm²、坑塘水面29.48 hm²、沟渠0.78 hm²）。整治后农田实行水稻—小麦轮作，由种植大户承包，统一经营与管理。

1.2 土壤样品采集与分析

土地整治前后两次采集土样，分别为2016年11月5日、2017年9月11日。采样前借助整治工程施工图、土方调配图及遥感图像，确定坑塘填埋区（WF）、挖方区（TC）、填方区（BT）及未动工区（U），整治前后均采集样品43个（图1）。其中TC 15个、BT 16个、U 6个，用手持式GPS精确定位。WF整治前样品来源于土方调配图确定的土源区土壤，整治后采样则为WF 6个样品。按“S”型采集0~20 cm表土，五点法混合，采集鲜土约2 kg。室内风干，过2 mm筛，剔除石砾和植物残体等杂物。土壤质地采用粒径分析仪（BT-9300Z，百特，丹东）测定^[22]，土壤pH采用电位法（水：土=1：2.5），土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定^[23]，土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定，土壤有效磷采用碳酸氢铵浸提—钼锑抗比色法测定，土壤速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定（FP640，精科，上海），土壤有效锌采用二乙基三胺五乙酸（DTPA）浸提—原子吸收分光光度法（SpectrAA-220FS，Varian，美国）测定，土壤有效硅采用柠檬酸缓冲浸提—硅钼蓝比色法测定^[24]。同一指标做3次重复，取其平均值。

1.3 遥感数据解译与处理

土地整治前、中、后3期遥感影像购自美国地球眼卫星公司（Earth Eye Satellite, Inc., USA），分别为2016年8月22日、2017年4月6日和2017年8月23日（图2），其空间分辨率为0.41 m^[25]。对三期影像剪裁处理，并按常规方法几何校正、大气

表1 不同土地平整类型区土壤性状描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil properties in farmlands different in leveling type						
平整方式 Type of land consolidation	整治时间 Time of land consolidation	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%	pH	有机质SOM/ (g·kg ⁻¹)
WF	前Before	66.40 ± 1.60b	30.04 ± 1.70a	3.15 ± 0.29a	6.42 ± 0.05c	24.64 ± 1.72c
	后After	62.47 ± 5.11b	32.79 ± 4.53a	4.09 ± 1.09b	5.87 ± 0.09a	15.12 ± 1.17a
TC	前Before	66.57 ± 1.93b	29.67 ± 1.83a	3.36 ± 0.20ab	6.40 ± 0.11c	24.57 ± 2.56c
	后After	56.26 ± 5.97a	38.47 ± 4.88b	5.50 ± 1.08c	6.26 ± 0.09b	13.08 ± 2.27a
BT	前Before	66.62 ± 1.26b	29.69 ± 1.24a	3.30 ± 0.20a	6.35 ± 0.10bc	24.03 ± 2.63c
	后After	57.33 ± 4.50a	37.31 ± 4.00b	4.88 ± 0.90c	6.40 ± 0.11c	20.65 ± 3.32b
U	前Before	66.49 ± 3.06b	29.72 ± 2.81a	3.40 ± 0.31ab	6.36 ± 0.11bc	24.70 ± 1.85c
	后After	65.86 ± 2.94b	29.71 ± 2.81a	3.39 ± 0.39ab	6.38 ± 0.12c	24.77 ± 4.93c
平整方式 Type of land consolidation	整治时间 Time of land consolidation	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)	有效锌 Available Zn/ (mg·kg ⁻¹)	有效硅 Available Si/ (mg·kg ⁻¹)
WF	前Before	3.95 ± 0.20c	10.96 ± 1.53a	99.27 ± 11.05a	11.90 ± 0.71c	219.8 ± 5.63a
	后After	2.36 ± 0.18a	16.25 ± 7.67a	96.60 ± 12.81a	8.73 ± 0.22a	265.2 ± 10.40b
TC	前Before	3.84 ± 0.23c	13.56 ± 2.37a	105.9 ± 11.32ab	11.49 ± 0.93c	214.0 ± 10.13a
	后After	2.39 ± 0.40a	14.35 ± 9.79a	94.98 ± 15.67a	8.06 ± 0.60a	327.8 ± 6.61d
BT	前Before	3.86 ± 0.24c	15.92 ± 4.55a	114.1 ± 13.48bc	11.57 ± 1.00c	217.9 ± 11.14a
	后After	3.45 ± 0.31b	17.64 ± 9.06a	114.2 ± 13.45bc	9.82 ± 0.52b	303.9 ± 9.12c
U	前Before	3.85 ± 0.30c	11.98 ± 6.37a	121.7 ± 13.24c	11.78 ± 0.93c	212.7 ± 11.03a
	后After	3.85 ± 0.39c	12.13 ± 7.19a	108.2 ± 6.22abc	11.60 ± 0.66c	213.3 ± 7.01a

注：表中数据为平均值 ± 标准差，同列无相同字母表示差异显著（P<0.05）。下同 Note: The data in the table are means ± standard deviation. Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same below

显著，降幅由低到高依次为未动工区、填方区、坑塘填埋区和挖方区。有效硅含量变化则相反，尤其是整治后挖方区有效硅含量高达327.8 mg kg⁻¹，与整治前后呈显著差异水平；有效磷和速效钾受影响很小，变化不显著。总之，土地平整对表层土壤理化性状影响较大，且填方区小于坑塘填埋区和挖方区，未动工区无显著性影响。

2.2 不同土地平整类型区水稻长势的空间差异

归一化植被指数（NDVI）对地表覆盖极为敏感，可很好地反映水稻生长状态和覆盖度变化^[27]。由表2 NDVI可知，坑塘填埋区和挖方区两种不同平整区水稻长势与未动工区相比存在着显著性差异（P<0.05），填方区与未动工存在一定的差异；其中，未动工区NDVI平均值最高，挖方区NDVI平均值最小，两者相差11.65%。从标准差来看，未动工区各地块NDVI差异最小，土地平整区

水稻NDVI存在异质性，与实地调查时未动工区水稻长势好且均匀相吻合（图3）。水稻NDVI值由高到低依次为未动工区、填方区、坑塘填埋区和挖方区，这一结果与各平整区土壤性状变化应存在相关性。

2.3 土壤性状与水稻长势之间关系

平整后由种植大户承包，统一施肥，统一管理。水稻生长差异主要取决于平整后土壤养分状况。从表3可以看出，各田块NDVI值与有机质、全氮、速效钾、有效锌含量呈极显著正相关关系，与有效硅含量呈显著负相关关系，与土壤黏粒、pH、有效磷无显著相关性（P>0.05）。从系数大小来看，有机质、全氮和有效锌对水稻NDVI值影响较大，对三者叠加与NDVI值多元回归分析，R²值达到了0.732。表明有机质、全氮和有效锌是影响水稻生长的关键性因素。

表2 不同土地平整类型区水稻NDVI值描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of NDVI in farmlands different in leveling type				
	坑塘填埋区 Waterbody filling area	挖方区 Topsoil cutting area	填方区 Borrowed topsoil area	未动工区 Undisturbed area
NDVI	0.763 ± 0.03b	0.747 ± 0.06a	0.808 ± 0.05bc	0.834 ± 0.02c

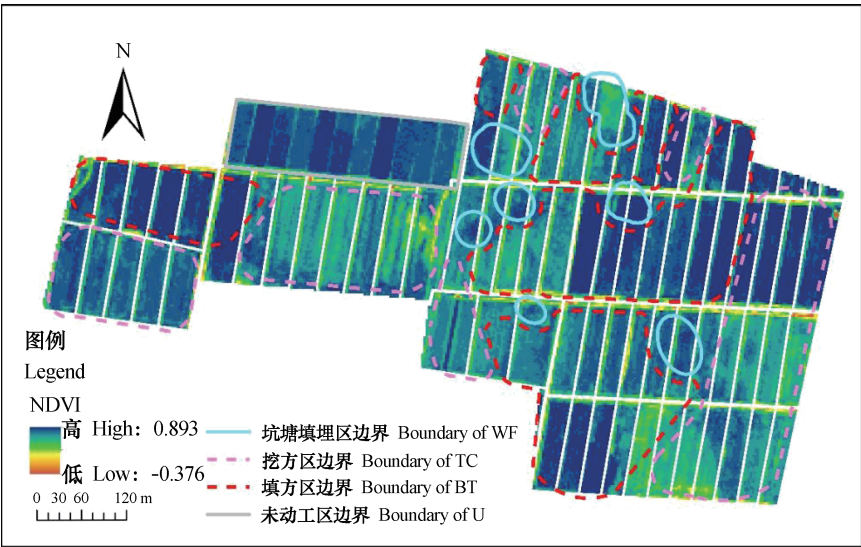


图3 研究区水稻田NDVI空间分异

Fig. 3 Spatial variability of NDVI of the paddy fields in the study area

表3 43个样点土壤参数与NDVI值之间相关关系

Table 3 Relationships between soil properties and NDVI in the 43 sampling sites						
	黏粒Clay	pH	有机质SOM	全氮TN	有效磷AP	速效钾AK
NDVI	0.001	0.195*	0.656**	0.617**	0.141*	0.336**
	有效锌 Available Zn	有效硅 Available Si	有机质+全氮 SOM + TN	有机质+有效锌 SOM+ Available Zn	有机质+全氮+有效锌 SOM + TN+ Available Zn	
NDVI	0.625**	0.163*	0.728**	0.703**	0.732**	

注：表中数值为判定系数 R^2 ，*表示存在显著性影响 ($P<0.05$)，**表示存在极显著性影响 ($P<0.01$) Note: The value in the table is the coefficient of determination R^2 , * means significant difference at 5% level, and ** means extremely significant difference at 1% level

由图5可知，不同平整区土壤性状与水稻NDVI值之间相关性差异，以未动工区 R^2 值最大。从单个指标来看，土壤有机质、总氮和速效锌与NDVI值相关性显著，但不同平整区内有机质、全氮和有效锌与NDVI值相关系数又明显不同，如坑塘填埋区和未动工区土壤有机质与NDVI值相关系数为0.412和0.796，这一方面说明短期干扰造成了水稻生长状况不均一，土壤有机质是影响水稻长势的重要因素，在作物生长中重要作用^[28]；另一方面也说明坑塘填埋区土壤理化性状呈整体下降趋

势，土壤性状趋于不稳定状态，减低了土壤性状与水稻NDVI值之间相关关系。全氮和有效锌的表现与有机质相似，也是影响水稻生长的重要因素之一^[29]。然而，有效硅与NDVI值呈显著性负相关关系 ($P<0.05$)，水稻是典型的喜硅作物，硅可促进水稻光合作用，但本研究区土壤有效硅含量偏高，超过水稻生长适宜的浓度范围^[29]，相关系数仅为0.163。从实地调查来看，NDVI值不但反映了水稻长势，在一定范围内，也可以很好地反映土地平整后的土壤养分状况。因此，NDVI可以替代实

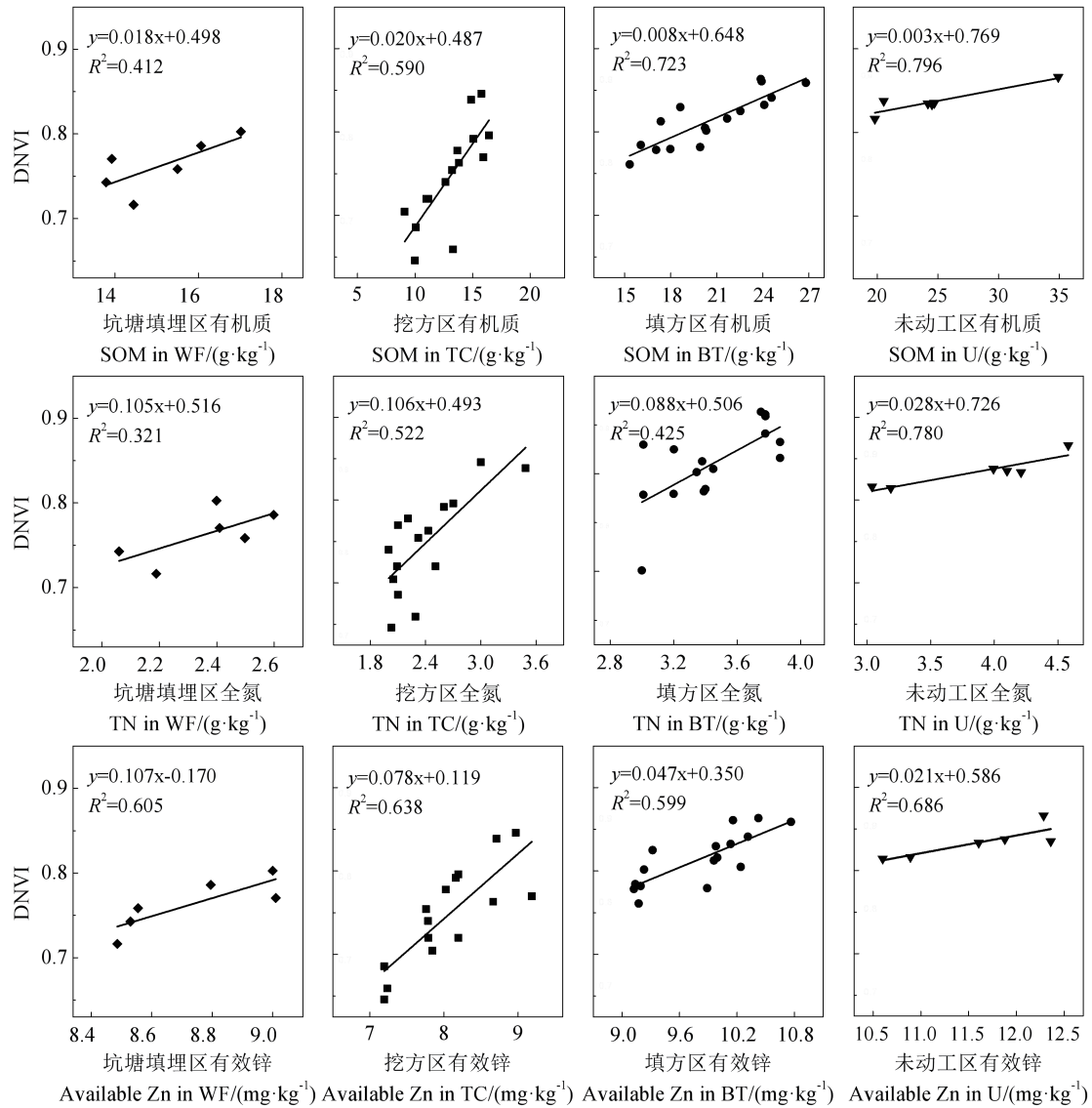


图4 不同平整区土壤有机质、全氮、有效锌与归一化植被指数NDVI关系图

Fig. 4 Relationships of NDVI with soil organic matter, total nitrogen, and available zinc in the farmland relative to type of leveling

地土壤调查，便捷地监测大范围土地整治的质量状况。

3 讨论

3.1 不同平整方式下土壤理化性状的变异特征

土地整治是促进可持续利用的重要工具，但整治过程中深翻、挖土、填埋等不可避免地打破原土体构型，改变了土壤养分垂直或水平分布^[30-31]。过去与未来十年内我国大面积开展土地整治，国家要求2020年前完成8亿亩(1 hm²=15亩)高标准永久基本农田建设，2030年前完成12亿亩高标准永久

基本农田建设。然而，土壤环境一个微小的改变可能引起全球环境的重大变化，尤其是中国正在大规模的进行土地整治，势必对土壤碳氮循环产生巨大影响。土地平整时施工方为减少土方运输成本，一般采用局部土方平衡方案，这种施工方式加大了挖方、填方的概率。同时，大量深层土被翻到表层，坑塘填埋往往先采用泥浆充填，土方无法压实，整治后极易产生塌陷。从表1来看，坑塘填埋区、挖方区、填方区均对土壤理化性质产生了短期干扰。坑塘填埋区pH含量范围5.81~5.98，与整治前相差极大($P<0.05$)。土壤反酸严重，主要原因是充浆淤泥来源于河底泥，苏南地区河底泥酸化严重，

高潜水极易反酸。这一特点与前人研究结果极为相似^[28, 32]。坑塘填埋区和挖方区土层厚度受施工影响,一般较薄,质地黏重。这极易形成障碍层,易导致作物生长受影响^[33]。有效硅主要存在于土壤溶液的硅酸中^[29],整治后表土与下层心土充分混合,新耕作层黏性增加,可以吸附更多的硅酸。这是坑塘填埋区、挖方区、填方区均高于未动工区的原因。

土壤养分受人为和自然两种因素调控^[33],土地整治人为干扰过程与土壤养分变化有着密不可分的联系,一般认为随平整年限的增长,有机质以及氮磷钾等出现先减后增的趋势,短期内则出现肥力下降情况^[30]。本研究田间调查也同样发现短期内土地平整对土壤性状和作物生长有显著扰动,这与前人研究结果一致^[13, 33]。同时,发现有效磷和速效钾变化不显著,这与胡雅等^[33]研究结果完全不同。在田间管理一致的条件下,速效磷和速效钾主要受成土母质控制,土地平整主要影响表土土壤,尤其是对耕作层的扰动,几乎不改变母质对有效磷和速效钾的控制条件。除了坑塘填埋区外,不可能造成大幅变化。前人研究发现土壤有效磷和速效钾的大幅度下降,我们推测主要原因是施肥和田间管理不一致。

3.2 水稻长势NDVI计量特征的影响因素

耕作层土壤内含丰富的有机质和营养元素,是农作物生长的基础^[28, 30]。从表3线性回归结果来看,土壤有机质、全氮和有效锌是水稻长势NDVI值的控制性因素。本研究中未动工区NDVI值最大,未动工区因未有任何扰动,表土依然是高度发育的熟土层,再加上江南平原雨热同季,适宜水稻种植,长势最好。挖方区和填方区水稻NDVI值下降,尤其是标准差变大,说明平整区内水稻长势NDVI计量特征发生了明显的空间分异,且填方区NDVI值显著高于挖方区($P<0.05$)。这主要与平整方式有关,土地平整时,一般采用挖高填低,推平地表,挖方区表层熟土回埋至填方区,填方区表层土壤依旧肥沃。但坑塘填埋区NDVI值处于较低水平,与未动工区差异显著($P<0.05$)。主要原因是坑塘填埋采用泥浆充填,再回填表土,无法压实。夏季降水后疏松土层出现不均匀沉降,扰动了回填的表土,造成耕作层土壤养分状况变异,导致坑塘填埋区内水稻长势不仅差,还不均匀。短期内

土地平整治干扰了表层土壤养分状况,从而影响水稻长势。先前研究表明,土地整治后短期内对土壤理化性质造成显著或极显著的影响,严重压实土壤,黏性增大,肥力下降,限制耕作和植物生长^[31]。且这种不利影响主要发生于土地整治后第一年,土壤层次被扰动,尤其是表层土壤,表层理化性质发生改变^[13, 33]。一般认为短时间内土壤受机械混合作用,质量呈下降趋势^[30]。这与本研究中不同挖方区、填方区的结果相似。

3.3 减缓土地平整对土壤的扰动

新时代生态文明建设成为主旋律,土地整治应该从新增耕地、提升产能向注重耕地多功能生态服务价值的生态型整治转变。本研究与先前研究均表明,土地平整短期内会对土壤环境造成严重的干扰,原土体构型破坏,表层土壤养分流失严重。其实这些与当前不科学的平整方式有关,施工时过分节约土方运输成本。土地整治规程规定施工时应先将表土层剥离,然后客土回填,场地平整后再将表土覆盖上去。但实际施工中几乎很少严格执行这个规定,力求施工时间和运输成本最少,直接推高填低,导致表土变薄,养分下降。与此同时,施工中忽视土壤保护,大量表土损失,造成短期内土壤质量下降。尤其是坑塘填埋区和挖方区,今后土地平整施工应严格遵守规范。就坑塘填埋而言,应考虑到第一次浇灌后会有下沉现象,填土土层厚度应根据实际情况有所加厚。对于挖方区,先将0~20 cm表层熟土移走,再对下层田面按不大于3 cm高差的标准统一平整,最后将表层熟土回填^[13],有条件时还应覆盖一次腐殖土,这一措施有利于表土内部平衡和保持田间地力均等。

此外,国家规程对土地整治中土壤质量要求不全面,仅对整治后土层厚度提出了具体要求,对土壤性状未作要求^[31]。应当完善有关规范,兼顾多功能生态服务价值。土地整治一般会促进区域农田生态环境变化,但整治后农田与优质农田相比尚有一定程度的质量提升空间,后续管理应当生态管控,科学施肥,多施绿肥、腐殖质肥。同时,生态管护要与当地土壤、气候特点以及作物生长需要结合,制定最佳施肥方案和使用量。根据不同平整区实际情况,建立长效机制,实现农业生产与生态保护共赢。

4 结 论

苏南平原区土地整治对土壤性状的短期干扰较大, 不同平整方式下土壤质量和水稻长势由高到低均为未动工区、填方区、坑塘填埋区和挖方区; 土地平整引起的SOM、TN和Available Zn的空间变异是水稻NDVI异质性的主因。因此, 苏南平原区土地整治施工时应关注坑塘填埋工艺, 表土尽量内部平衡, 减少挖填方干扰。对整治缺陷区应实施绿肥压青、秸秆还田、施农家肥或测土配方施肥等措施, 强化后续管护或二次整治, 建立整治监测长效机制, 实现工程配套型土地整理向生态型国土综合整治转变。

参 考 文 献

- [1] Yan J, Xia F, Bao H X H. Strategic planning framework for land consolidation in China: A top-level design based on SWOT analysis. *Habitat International*, 2015, 48: 46—54
- [2] 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构. *地理学报*, 2013, 68 (8) : 1019—1028
Long H L. Land consolidation and rural spatial restructuring (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (8) : 1019—1028
- [3] Crecente R, Alvarez C, Fra U. Economic, social and environmental impact of land consolidation in Galicia. *Land Use Policy*, 2002, 19 (2) : 135—147
- [4] Sharifi A, Gorji M, Asadi H, et al. Land leveling and changes in soil properties in paddy fields of Guilan Province, Iran. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12 (1) : 139—145
- [5] 严金明, 王晓莉, 夏方舟. 重塑自然资源管理新格局: 目标定位、价值导向与战略选择. *中国土地科学*, 2018, 32 (1) : 1—7
Yan J M, Wang X L, Xia F Z. Remold new pattern of natural resource management: Target orientations, value guidelines and strategic choices (In Chinese). *China Land Science*, 2018, 32 (1) : 1—7
- [6] 冯应斌, 杨庆媛. 转型期中国农村土地综合整治重点领域与基本方向. *农业工程学报*, 2014, 30 (1) : 175—182
Feng Y B, Yang Q Y. Key research fields and basic directions of Chinese rural-land comprehensive consolidation in transitional period (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (1) : 175—182
- [7] FAO. The design of land consolidation pilot projects in Central and Eastern Europe. Rome: FAO, 2003: 2—3
- [8] 王军, 李正, 白中科, 等. 土地整理对生态环境影响的研究进展与展望. *农业工程学报*, 2011, 27 (13) : 340—345
Wang J, Li Z, Bai Z K, et al. Progress and prospect of ecological environment impact of land consolidation (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (13) : 340—345
- [9] 洪长桥, 金晓斌, 陈昌春, 等. 基于多源遥感数据融合的土地整治区产能动态监测: 方法与案例. *地理研究*, 2017, 39 (9) : 1787—1800
Hong C Q, Jin X B, Chen C C, et al. Dynamically monitoring productivity of cultivated land enrolled in land consolidation programs based: Methodology and a case study (In Chinese). *Geographical Research*, 2017, 39 (9) : 1787—1800
- [10] 王玉莹, 金晓斌, 范业婷, 等. 农村土地整治对促进农业现代化水平的影响分析. *中国土地科学*, 2017, 31 (8) : 69—76
Wang Y Y, Jin X B, Fan Y T, et al. The impact of rural land consolidation program on promoting the level of agricultural modernization (In Chinese). *China Land Science*, 2017, 31 (8) : 69—76
- [11] 李谦, 戴靓, 朱青, 等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究. *地理科学*, 2014, 34 (6) : 733—739
Li Q, Dai L, Zhu Q, et al. Ecological connectivity changes and its pattern optimization during land consolidation based on model (In Chinese). *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34 (6) : 733—739
- [12] 郭贝贝, 金晓斌, 林忆南, 等. 基于生态流方法的土地整治项目对农田生态系统的影响研究. *生态学报*, 2015, 35 (23) : 7669—7681
Guo B B, Jin X B, Lin Y N, et al. Determining the effect of the land consolidation project on the cropland ecosystem based on the ecological flow method (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (23) : 7669—7681
- [13] 叶艳妹, 吴次芳. 土地整理对土壤性状的影响及其重建技术和工艺研究. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2002, 28 (3) : 34—38
Ye Y M, Wu C F. Influence of land consolidation soil characteristic and the technology of soil reconstruction (In Chinese). *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2002, 28 (3) :

- 34—38
- [14] Brye K R, Slaton N A, Norman R J. Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey aquert. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (2) : 631—642
- [15] Hazeu G, Milenov P, Pedroli B, et al. High Nature Value farmland identification from satellite imagery, a comparison of two methodological approaches. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 30 (30) : 98—112
- [16] Brye K R, Slaton N A, Mozaffari M, et al. Short-term effects of land leveling on soil chemical properties and their relationships with microbial biomass. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (3) : 924—934
- [18] Hisatomi Y, Ohnishi M, Wakatsuki T. Dispersion of soil fertility in a field where was consolidated 37 years ago and influence for rice yield//Presentation paper for 17th World Congress of Soil Science, . Thailand, 2002
- [17] Sharma P, Singh P, Prasad R, et al. Land leveling effects on soil properties and crop productivity. *Indian Journal of Soil Conservation*, 2010, 38 (3) : 173—177
- [18] 叶晶, 何立平, 李东宾, 等. 土地整理对土壤微生物群落多样性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27 (4) : 1265—1270
- Ye J, He L P, Li D B, et al. Effect of land consolidation on soil microbial community diversity (In Chinese) . *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (4) : 1265—1270
- [19] 金晓斌, 丁宁, 张志宏, 等. 中国土地整治资金在省际间分配及土地整治效果. *农业工程学报*, 2012, 28 (16) : 1—9
- Jin X B, Ding N, Zhang Z H, et al. Inter-provincial allocation of land consolidation fund and effects of land consolidation in China (In Chinese) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2012, 28 (16) : 1—9
- [20] 谷晓坤, 范春晓, 柴铎, 等. 不同类型区农用地整治对农田生产能力的影响. *自然资源学报*, 2013, 28 (5) : 745—753
- Guo X K, Fan C X, Cai D, et al. Evaluation for the production ability of agricultural land in different types of agricultural land consolidation area (In Chinese) . *Journal of Natural Resources*, 2013, 28 (5) : 745—753
- [21] 严金明, 夏方舟, 李强. 中国土地综合整治战略顶层设计. *农业工程学报*, 2012, 28 (14) : 1—9
- Yan J M, Xia F Z, Li Q. Top strategy design of comprehensive land consolidation in China (In Chinese) . *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (14) : 1—9
- [22] 王璐, 仲启铖, 陆颖, 等. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (3) : 638—647
- Wang L, Zhong Q C, Lu Y, et al. Effect of plant community configuration on physical and chemical properties of coastal polder soil (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3) : 638—647
- [23] 陈浮, 杨宝丹, 马静, 等. 高浓度CO₂地下泄漏对土壤微生物群落结构的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (1) : 180—190
- Chen F, Yang B D, Ma J, et al. Effects of underground leakage of high concentration CO₂ on soil microbial community structure (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1) : 180—190
- [24] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39—236
- Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese) . 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39—236
- [25] Aguilar M A, Saldaña M M, Aguilar F J. GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34 (7) : 2583—2606
- [26] Crespi M, Colosimo G, Vendictis L D, et al. GeoEye-1: Analysis of radiometric and geometric capability//International conference on personal satellite services. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 354—369
- [27] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 等. 2000-2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2017, 32 (1) : 50—63
- Luo M, Jiapaer G, Guo H, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River basin from 2000 to 2013 (In Chinese) . *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (1) : 50—63
- [28] 李鸿. 稻草还田对土壤-稻麦体系硅与锌吸收利用的影响. 重庆: 西南大学, 2017
- Li H. Effect of rice straw returning on Si and Zn absorption and utilization of soil and crop in rice-wheat rotation system (In Chinese) . Chongqing: Southwest University, 2017
- [29] 刘涓, 杜静, 魏朝富, 等. 紫色土区土地整理年限对土壤理化特性的影响. *农业工程学报*, 2015, 31

- (10): 254—261
- Liu J, Du J, Wei C F, et al. Effects of land consolidation period of farmland on soil properties in purple region (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (10): 254—261
- [30] 王媛玲, 赵庚星, 王庆芳, 等. 丘陵区土地整理对土壤理化性状的影响. *农业工程学报*, 2011, 27 (9): 311—315
- Wang A L, Zhao G X, Wang Q F, et al. Effects of land consolidation on soil physical and chemical characteristics of hilly region (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (9): 311—315
- [31] 刘占军. 我国南方低产水稻土养分特征与质量评价. 北京: 中国农业大学, 2014
- Liu Z J. Nutrient characteristics and quality assessment of low-yield paddy soils in South China (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2014
- [32] 易琼, 杨少海, 黄巧义, 等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 176—183
- Yi Q, Yang S H, Hang Q Y, et al. Effect of soil ameliorants on soil properties and rice yield of acid sulfate paddy field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 176—183
- [33] 胡雅, 韩霁昌, 高红贝, 等. 沟道区土地整治前后土壤养分特性研究. *天津农业科学*, 2016, 22 (9): 20—24
- Soil nutrient characteristics in channel region prior and after land consolidation (In Chinese). *Tianjin Agricultural Sciences*, 2016, 22 (9): 20—24

Short Term Response of Soil Properties and Rice Growth to Land Consolidation in South of Jiangsu Province

LI Xiaoxiao¹ ZHU Fengwu² XU Taoyuan² YAO Xinchun² YU Man¹ CHEN Fu^{1†}

(1 School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

(2 Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Institute of Land Surveying and Planning of Jiangsu, Nanjing 210029, China)

Abstract 【Objective】As an important means to increase the area of cultivated land, improve farmland infrastructure and raise grain production capacity, land consolidation (merging and leveling) has been widely extrapolated throughout the country. Land consolidation is often accompanied by landfilling of ponds and pits and field leveling in the Plain of South Jiangsu, which are thought to pose a big risk of disturbing the soil environment. However, so far little attention has been paid to the potential short-term effect of farmland consolidation disturbing soil ecology. The aim of this study is to explore the short-term effect of land leveling relative to area on rice growth and specify soil factors that might affect the growth of rice in a short period of time after land consolidation, in an attempt to provide reference for monitoring soil quality, improving soil fertility and managing the ecology after land consolidation. 【Method】In this study, soil properties and rice NDVI were monitored via remote sensing and field surveys for analysis of short-term effects of land consolidation on soil and rice growth and their relationships, in Gengzhuang Village, Zhixi Town, Jintan District of Changzhou City. With the help of the engineering drawings of the land consolidation projects, remote sensing images, and field surveys, areas of waterbody filling (WF), topsoil cutting (TC), land filling (BT), and undisturbed land (U), were worked out, separately. Field monitoring of soil properties and rice growth in the first growing season in farmlands different in leveling degree. Topsoil samples were collected at 43 sampling sites, including 6 in Waterbody filling area, 15 in topsoil cutting areas, 16 in borrowed topsoil areas, and 6 undisturbed land areas, for analysis of certain basic physical and chemical indices, such as soil texture, pH, organic matter, total N, readily available

phosphorus, readily available K, and available Zn and available Si that have important influence on rice growth to determine soil nutrient status of the farmlands. Rice growth was monitored by means of the normalized difference vegetation index (NDVI), which was extracted from the GeoEye remote sensing images of the areas. 【Result】Effects of land consolidation on soil properties and rice growth were monitored via remote sensing and field investigation, Result show: (1) Land leveling seriously affected nutrient status of the topsoil layer, by decreasing the contents of soil organic matter, total nitrogen and available zinc significantly within a short period of time after the leveling, however, it increased the content of available silicon and had little impact on available phosphorus and available potassium. Soil nutrient status varied sharply with type of land consolidation, showing an order of $U > BT > FW > TC$; (2) NDVI of rice also varied with type of land consolidation, being 0.763 for WF, 0.747 for TC, 0.808 for BT and 0.834 for U and displaying an order of $Unworked > BT > FW > TC$. (3) NDVI of rice growth was significantly and positively related to contents of soil organic matter, total nitrogen and available zinc, with coefficient of determination being 0.656, 0.617, and 0.625, respectively. 【Conclusion】Spatial variations of the contents of soil organic matter, total nitrogen and available zinc caused by land leveling are the main factors leading to rice NDVI heterogeneity. Land consolidation has serious short-term effects on soil and crop growth. Fertilization to build up the soil and management and protection of the ecology should be adopted to realize the transformation from quantity-and-productivity-based land consolidation to ecology-based one.

Key words Land consolidation; Soil quality; Rice growth; NDVI; Short-term disturbance

(责任编辑: 卢 萍)