

1982—2012 年来杭州市郊水稻田有机质变化特征及其调控措施

李丹¹, 王京文¹, 李凤根², 杨文叶¹, 章林英¹

(1. 杭州市植保土肥总站, 浙江 杭州 310020; 2. 杭州市富阳区新登镇农业公共服务站, 浙江 富阳 311404)

摘要: [目的] 了解杭州市郊水稻田土壤有机质的长期演变, 为杭州市正在推进的精品化、高度集约化农业生产提供土壤肥力的精确管理依据。[方法] 利用历史资料和近期土壤质量调查数据探讨了近 30 a 来杭州市郊水稻田土壤有机质的变化特征。[结果] 从 1982—2012 年, 杭州市郊水稻田土壤有机质含量总体呈下降趋势, 平均降幅为 2.95%, 但各土种有机质变化有所差异。其中, 培泥砂田、小粉田、黄斑田、泥砂田和粉泥田的土壤有机质呈现增加趋势, 特别是培泥砂田, 土壤有机质含量增幅高达 22.86%; 而青紫泥田、青粉泥田和黄松田的土壤有机质呈现下降趋势, 且青紫泥田土壤有机质含量降幅高达 22.59%。[结论] 近 30 a 来, 杭州市郊水稻田土壤有机质发生了较大变化, 但其变化程度和变化方向因土壤种类而异。施肥结构、耕作方式及耕作制度是引起土壤有机质变化的主要原因。

关键词: 杭州市郊; 水稻田; 有机质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0131-05

中图分类号: S157.3

文献参数: 李丹, 王京文, 李凤根, 等. 1982—2012 年来杭州市郊水稻田有机质变化特征及其调控措施 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 131-135. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.024

Changing Characteristics and Improvement Measures of Soil Organic Matter in Paddy Land of Hangzhou Suburb During 1982—2012

LI Dan¹, WANG Jingwen¹, LI Fenggen², YANG Wenye¹, ZHANG Linying¹

(1. Plant Protection and Soil-fertilizer Station of Hangzhou City, Hangzhou, Zhejiang 310020, Zhejiang China; 2. Agricultural Public Service Station of Xindeng Town, Fuyang, Zhejiang 311404, China)

Abstract: [Objective] We investigated the variations of soil organic matter in paddy land of Hangzhou suburb over the last 30 years in order to provide basis for accurate soil fertility management and high intensive agricultural production. [Methods] Historic materials and current soil quality survey data were collected and compared to investigate the variations of soil organic matter. [Results] From 1982 to 2012, the mean content of soil organic matter decreased by 2.95%. The changes of soil organic matter varied with soil types. The mean content of soil organic matter in culture muddy-sandy field, silt paddy land, Fe-accumuli-stagnic anthrosols, muddy-sandy field and silt loamy paddy land showed an increasing trend, especially, in culture muddy-sand field, soil organic matter increased by 22.86%. In contrast, the mean content of organic matter in degleyed clayey paddy soil, blue silt loamy paddy soil and yellow loamy paddy soil showed a decreasing trend, and this decreasing trend in degleyed clayey paddy soil reached to 22.59%. [Conclusion] The content of organic matter in the paddy soils changed greatly during the past 30 years, and this change varied among different soil types. Fertilization structure, tillage practices and farming system were the main reasons that cause the variations of soil organic matter.

Keywords: Hangzhou suburb; paddy soil; organic matter

有机质是土壤的重要组成部分, 不仅在增加土壤肥力, 环境保护, 农业可持续发展等方面有着重要的

作用和意义, 还对全球碳平衡起着重要作用, 被认为是影响全球“温室效应”的主要因素^[1]。土壤有机质

的变化在短时间内难以体现,而且其含量也有较大的空间变化,因此,需要在较大的空间尺度和较长的时间尺度上来反映土壤有机质的变化情况。近 20 a 来,土壤碳库和土壤固碳等深受人们重视,并开展了较为广泛的研究^[2-5],但至今对土壤有机质较长时间尺度的变化及其变化的空间差异性的研究相对较少^[6]。

近 10 a 来,杭州市相关县(市、区)及其他科研单位对杭州市农田土壤的有机质含量进行过一些分析,也获得了一系列农田土壤有机质的变化信息。例如:谢国雄等^[7]将桐庐县耕地有机质现状与第二次土壤普查数据进行比较,表明 28 a 间桐庐县耕地有机质含量下降了 19.4%;徐祖祥等^[8]对临安市农田土壤肥力的分析表明,近 30 a 来土壤有机质平均含量呈下降趋势;孔樟良等^[9]对建德市 1981—2012 年的耕地土壤肥力检测数据进行分析表明,土壤有机质呈现轻微下降趋势,耕地中存在部分土壤有机质偏低的现象。这些研究都不同程度地揭示了杭州市某些区域农田土壤有机质的特征或变化趋势,但杭州市郊水稻田作为杭州市区居民的重要粮食生产基地,至今为止,其养分状况及变化趋势,特别是有机质的时空变化特征鲜有报道。

为合理利用有限的耕地,本研究拟利用第二次土壤普查资料和 2009—2012 年土壤采样分析数据,探讨近 30 a 来杭州市郊水稻田耕层土壤有机质的变化特征,以期为杭州市正在推进的精品化、高度集约化农业生产提供土壤肥力的精确管理依据,对实现耕地高产稳产和可持续发展有十分重要的意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

杭州市位于浙江省偏北地区,地处长江三角洲南翼、杭州湾西端、钱塘江下游、京杭大运河南端。四季分明,温和湿润,光照充足,雨量充沛,属亚热带季风性气候,年平均气温 17.1 ℃,年平均相对湿度 71.0%,常年平均降雨量 1 455 mm,年蒸发量为 1 400 mm。

1.2 资料收集

1982 年杭州市郊水稻田土壤有机质数据主要来自第二次土壤普查资料,除已出版的《杭州土壤》^[10]外,还参照了杭州市植保土肥总站编辑的《杭州市 1:25 万土壤图》、《杭州市分县分乡土种面积表》和《杭州市水稻田土壤理化数据分析统计资料》等。

1.3 土壤样品的采集与分析方法

在研究第二次土壤普查资料基础上,结合杭州市郊水稻种植情况,于 2009—2012 年选择不同区域的

水稻田土壤作为研究对象。土壤样品采集考虑了典型性和代表性,采用全球定位仪(GPS)技术,记录采样点经纬度,村镇及农户姓名,土壤类型及耕层厚度、种植作物等。采用多点(15~20 个)混合采样法采集耕层(0—20 cm)土壤,混合后采用四分法,留 1 kg 左右土壤带回室内供分析用。共采集土壤样品 266 个,主要分布在西湖区、江干区、拱墅区及滨江区。土壤有机质含量采用油浴加热—重铬酸钾容量法测定^[11]。第二次土壤普查土壤样品于 1982 年春采集,采用多点混合采样法采集耕层土壤,有机质含量分析方法也为油浴加热—重铬酸钾容量法。

1.4 数据处理

数据经 Excel 处理,利用 SPSS 软件进行单样本 *t* 检验;以各土种 2009—2012 年有机质含量为单变量,与对应土种 1982 年有机质含量平均值为常量,进行 *t* 检验,比较平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质现状

2009—2012 年采集的 266 个土壤样品有机质含量的检测结果表明(表 1),杭州市郊水稻田耕层土壤有机质平均含量为 29.98 g/kg,但变化较大,范围在 9.87~49.84 g/kg 之间,标准差为 7.08,变异系数达 23.63%。按浙江省土壤分类系统,分属渗育、潜育和脱潜 3 个水稻土亚类。不同类型水稻土的耕层土壤有机质含量也存在较大差异,其耕层有机质平均含量由高到低分别为:潜育水稻土(32.68 g/kg) > 脱潜水稻土(30.69 g/kg) > 渗育水稻土(27.30 g/kg)。其中,变幅最大的是渗育水稻土,变异系数达 28.93%,其有机质含量最高的达 49.84 g/kg,而最低的仅为 9.87 g/kg,两者相差 6.6 倍;其次为潜育水稻土,变异系数达 17.86%,脱潜水稻土变幅最小,变异系数为 16.06%。

表 1 杭州市郊水稻田有机质现状

水稻土类型 (省级亚类)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)			标准差	变异 系数/%
	最小值	最大值	平均值		
渗育水稻土	9.87	49.84	27.30	7.90	28.93
潜育水稻土	17.06	48.05	32.68	5.84	17.86
脱潜水稻土	13.69	44.96	30.69	4.93	16.06
合计	9.87	49.84	29.98	7.08	23.63

2.2 土壤有机质变化特征

将 1982 年第二次土壤普查杭州市郊水稻田土壤有机质含量与 2009—2012 年采集的土壤样品进行分级对比,结果见表 2。

表2 杭州市郊水稻田有机质含量分级

级别	有机质/ (g·kg ⁻¹)	1982年有机质 比例/%	2009—2012年 有机质比例/%
1	>40	17.91	9.40
2	30~40	25.37	42.48
3	20~30	40.30	37.22
4	10~20	16.42	10.53
5	<10	0.00	0.37
合计		100.00	100.00

由表2可知,近30a来,杭州市郊水稻田土壤有机质含量级别有了较大变化。有机质含量达到极丰富水平(>40 g/kg)的比例,已由第二次土壤普查时(1982年)的17.91%下降到2012年的9.40%,降幅高达47.52%;有机质含量较低水平(10~20 g/kg)的比例,已由第二次土壤普查时(1982年)的16.42%

下降到2012年的10.53%,且2012年有0.37%的样点有机质含量不足10 g/kg;与此相反,有机质含量达到较丰富水平(30~40 g/kg)的比例却由第二次土壤普查时(1982年)的25.37%上升到2012年的42.48%,比例几乎翻倍。由此可见,近30a来,杭州市郊水稻田土壤有机质含量已从1982年的中高水平为主变为2012年的中等水平为主,呈现出明显的下降趋势。

为了解杭州市郊近30a来不同土种有机质含量变化情况,将2010—2012年采集的266个土壤样品的有机质含量按土种进行统计,分别为培泥砂田、泥砂田、小粉田、黄松田、黄斑田、粉泥田、青紫泥田和青粉泥田。并与1982年第二次土壤普查时相对应土种的有机质含量平均值进行单样本 t 检验,结果见表3。

表3 近30a来杭州市郊水稻田有机质含量变化情况

主要土类	1982年		2012年			标准差	变异系数/%	样品数
	平均值/ (g·kg ⁻¹)	平均值/ (g·kg ⁻¹)	比1982年 增加/%	极小值/ (g·kg ⁻¹)	极大值/ (g·kg ⁻¹)			
培泥砂田	19.55	24.02**	22.86	15.66	32.03	4.91	20.46	67
泥砂田	39.98	43.42**	8.62	38.20	49.84	3.97	9.15	10
小粉田	26.60	30.82**	15.86	17.99	36.87	5.59	18.15	32
黄松田	20.08	18.31	-8.81	9.87	22.97	6.44	35.17	6
黄斑田	29.77	31.43**	5.58	23.29	43.53	4.94	15.72	23
粉泥田	30.55	33.04*	8.15	17.06	48.05	6.05	18.32	78
青紫泥田	41.63	32.22**	-22.59	26.93	44.96	3.98	12.34	31
青粉泥田	33.54	28.20**	-15.92	13.69	36.30	5.40	19.16	19
市郊	30.89	29.98	-2.94	9.87	49.84	7.08	23.63	266

注:*表示有机质含量比1982年有显著变化;**表示有机质含量比1982年有极显著变化;无*表示有机质含量与1982年相比无显著差异。

从表3可以看出,总体来讲,近30a来,8个土种的有机质含量平均值轻微下降,即从第二次土壤普查时的30.89 g/kg下降到了2012年的29.98 g/kg,但降幅不显著,仅为2.95%。土壤中有机质含量变化因土壤种类而异。进行比较的8个土种中,近30a来,土壤有机质含量上升的有5个土种,下降的有3个土种。其中增幅最大的是培泥砂田,从第二次土壤普查时的19.55 g/kg上升到了2012年的24.02 g/kg,增幅高达22.86%,经SPSS分析,达到了极显著水平。小粉田、泥砂田和黄斑田的有机质含量也呈极显著上升,增幅分别达15.86%,8.62%和5.58%;粉泥田有机质含量增幅为8.15%,也达到了显著水平。而有机质含量下降的3个土种分别为青紫泥田、青粉泥田和黄松田,其中青紫泥田和青粉泥田的降幅都呈极显著水平,分别高达22.59%和15.92%,而黄松田有机质虽有下降,但降幅不显著。

2.3 有机质变化原因

土壤有机质是土壤的重要组成部分,因环境变化或季节性水热条件的变化,其始终处于不断的积累与降解动态变化之中。农业生产中各种有机物质的输入和输出及影响土壤有机质形成与降解因素的变化都将在一定程度上改变土壤有机质的平衡。结合我市情况,对近30a来杭州市郊水稻田土壤有机质的变化原因分析如下。

(1) 有机肥料投入减少。众多研究表明,肥料种类和施用量可对土壤有机质的积累产生很大的影响。有机肥的施用、绿肥的翻压和农作物秸秆还田均可促进土壤有机质的积累,而长期单一施用化肥可能导致土壤有机质的下降^[12-14]。有资料显示^[15],从20世纪70年代末开始,杭州市郊化肥施用量显著增加,氮肥由1977年的2.89 kg/hm²上升到1984年的7.26 kg/hm²,增幅高达151.21%。与此相反,绿肥种植面

积却呈现显著下降的趋势,1966年杭州市绿肥种植面积高达 101 333 hm²,以后逐年减少,到 1995 年仅 16 493 hm²,降幅高达 83.72%。此外,80 年代以后,畜禽粪便施用也逐年减少,作物秸秆资源大量剩余,就地焚烧现象十分严重,有些农田已基本没有有机肥料的投入。这可能是引起近 30 a 来杭州市郊水稻田土壤有机质下降的主要原因之一。

(2) 耕作制度改变。杭州市郊部分稻田由双季稻改为单季稻或者水旱轮作。在种稻淹水条件下,土壤水分状况属于人为滞水水分状况,全剖面土壤全为潮态或湿态,土壤通气性较差,有机物质属于嫌气分解,发酵过程所释放的能量远低于好气分解,有机质降解缓慢。而由双季稻改为单季稻或者水旱轮作后,大大改变了土壤的水热条件,由于土壤通气性增强促进土壤微生物活性,加速了土壤有机质的矿化作用,促进有机质分解^[16-17]。这也是引起近 30 a 来杭州市郊水稻田土壤有机质下降的主要原因之一。

(3) 耕作方式影响。传统耕作方式频繁的土壤扰动可能导致土壤有机质因矿化或土壤侵蚀而流失,最终造成农田土壤有机质下降^[18]。

(4) 土地平整。近年来,在标准农田建设和土地平整过程中,有些稻田进行了平整,势必影响表土有机质的含量。

3 讨论与结论

目前,杭州市郊水稻田土壤有机质含量主要在 20~40 g/kg 范围内,平均为 29.98 g/kg,属中等水平。不同类型水稻土的耕层土壤有机质含量差异较大,其耕层有机质平均含量由高到低分别为:潞育水稻土>脱潜水稻土>渗育水稻土。

杭州市郊水稻田土壤有机质含量在近 30 a 来变化较大。总体来讲,杭州市郊水稻田土壤有机质含量已从 1982 年的中高水平为主变为 2012 年的中等水平为主,呈现出明显的下降趋势。统计分析不同土种的结果表明,土壤有机质含量已由 1982 年的 30.89 g/kg 下降至 2012 年的 29.98 g/kg,降幅为 2.95%。土壤有机质变化程度和变化方向因土壤种类而异。其中土壤有机质增加的土种有培泥砂田、小粉田、黄斑田、泥砂田和粉泥田,特别是培泥砂田,土壤有机质含量增幅高达 22.86%;而土壤有机质下降的土种有青紫泥田、青粉泥田和黄松田,且青紫泥田土壤有机质含量降幅高达 22.59%。分析认为,施肥结构、耕作方式及耕作制度是引起土壤有机质变化的主要原因,建议采取以下措施进行调控,确保农作物正常生长。

3.1 大力推广商品有机肥

据统计,2013 年杭州市纳入政府补贴的商品有机肥生产企业达 30 家,年生产商品有机肥 5.00×10⁵ t,可消纳畜禽粪便资源总量约 2.20×10⁶ t。自 2009 年开始实施农业部《测土配方施肥补贴》项目以来,在全市范围内大面积推广施用商品有机肥,2013 年推广应用 1.25×10⁵ t,施用面积 41 667 hm²,其中市郊水稻田施用有机肥面积为 4 433 hm²,目前有机肥每公顷施用量为 2 250 kg。根据市郊水稻田有机质下降趋势、农业产业发展情况和政府不断加大的补贴力度,将大大提高农户施用有机肥的积极性,适当增加有机肥单位面积施用量,推广应用前景广阔。

3.2 推进作物秸秆综合利用

作物秸秆是重要的有机肥源,是当前中国农田唯一可靠的潜在有机肥源。秸秆还田有利于保持土壤肥力、改善土壤理化性状,是国内外提倡的保护性耕作措施之一。按照现有农业生产水平,连续 3 a 秸秆还田,可增加土壤有机质 0.2%~0.4%^[19]。目前,秸秆还田还是以直接还田为主,但在降解、吸收等方面存在一系列问题。因此,结合杭州市郊实际和农业部土壤有机质提升补贴项目(秸秆腐熟剂),可采取以下措施:早稻秸秆应根据稻田有机质含量,用秸秆快速腐熟剂处理后,部分直接还田,部分移出稻田;单季稻和连作晚稻秸秆可直接还田或覆盖在冬种作物上。

3.3 加大冬绿肥翻压面积

种植绿肥能为土壤提供丰富的养分,具有显著的增肥功效。绿肥翻压进入土壤后,增加了土壤的新鲜有机能源物质,使微生物迅速繁殖,活动增强,从而促进腐殖质的形成,养分的有效化,加速土壤熟化。长期以来,绿肥作物一直是杭州市农业生产的重要有机肥源,但到了 20 世纪 90 年代初期,绿肥产量剧减,这严重影响了杭州市农业的发展。针对杭州市郊水稻田土壤有机质现状,拟在有机质含量处于 4,5 级水平(≤20 g/kg)的水稻田采取冬种绿肥进行翻压的措施,以增加土壤有机质含量。

3.4 采取保护性耕作方式

保护性耕作因其具有保持水土、降低生产投入、增加土壤肥力和产量等优点,已受到世界许多地区的陆续实施。免耕作为保护性耕作的极端形式,在 CO₂ 和 N₂O 等温室气体含量不断上升的背景下更是备受关注。此外,垄作也是保护性耕作中行之有效的形式之一。而垄作免耕将两者很好地结合起来,不仅能增加表层土壤的有机质含量,还能促进水稻根系生长,有利于下层土壤有机质的累积^[20]。

[参 考 文 献]

- [1] 芦思佳. 土壤有机碳的影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(6): 3078-3080.
- [2] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 788-796.
- [3] 章明奎, 周翠. 杭州市城市土壤有机碳的积累和特性[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 19-21.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [5] 张国, 曹志平, 胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1921-1930.
- [6] Yanai J, Mishina A, Furakawa S, et al. Spatial variability of organic matter dynamics in the semi-arid croplands of Northern Kazakhstan [J]. Soil Science Plant Nutrient, 2005, 51(2): 261-269.
- [7] 谢国雄, 倪中应. 28 a 来杭州市桐庐县耕地有机质变化及其改良[J]. 农学学报, 2013, 3(9): 17-21.
- [8] 徐祖祥, 祝小祥, 徐进, 等. 临安市近 30 a 农田土壤地力演变状况[J]. 农学学报, 2014, 4(4): 21-25.
- [9] 孔樟良, 赵玲玲, 郑铭洁, 等. 建德市耕地土壤养分的历史演变与施肥对策[J]. 浙江农业科学, 2015, 56(1): 118-120.
- [10] 杭州市土壤普查办公室. 杭州土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991: 1-335.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [12] 赵鑫, 宇万太, 李建东, 等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2203-2209.
- [13] 张珺. 种植利用紫云英对南方稻田土壤肥力性状影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [14] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302.
- [15] 中共杭州市委杭州市人民政府农业和农村工作办公室. 杭州农业志[M]. 北京: 方志出版社, 2003: 260-266.
- [16] 章明奎, 唐红娟, 常跃畅. 黄斑田(铁聚水耕人为土)返旱后土壤发生学性质的变化[M]. 电子科技大学: 面向未来的土壤科学(上册), 2012, 349-354.
- [17] 蔡燕飞, 章家恩, 张杨珠, 等. 稻作制度对红壤性水稻土有机质特征的影响[J]. 土壤, 2006, 38(4): 396-399.
- [18] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 788-796.
- [19] 胡星. 秸秆全量还田与有机无机肥配施对水稻产量形成的影响[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2008.
- [20] 彭娟, 符卓旺, 朱洁, 等. 耕作制度对紫色水稻土有机碳累积及矿化动态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 175-182.
- [12] 王明月, 李加林, 郑忠明, 等. 基于生态功能强度分析的滩涂围垦区景观格局优化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1943-1949.
- [13] 叶延琼, 陈国阶. GIS 支持下的岷江上游流域景观格局分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(1): 112-115.
- [14] 卢远, 苏文静, 华瑾, 等. 左江上游流域景观生态风险评价[J]. 热带地理, 2010, 30(5): 496-502.
- [15] Xian G, Crane M. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(2): 203-215.
- [16] 美国地质调查局官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. (1985-07-03, 1995-06-02, 2005-04-20, 2015-02-20) [2015-04-12] <http://glovis.usgs.gov/>
- [17] 地理空间数据云官方网站. 影像数据下载[EB/OL]. (2005-04-20) [2015-04-12] <http://datamirror.csdb.cn/>
- [18] 坦帕湾官方网站. 坦帕湾水图集[EB/OL]. (2006-03-07) [2015-04-12] <http://www.tampabay.wateratlas.usf.edu/digitalibrary/>
- [19] 刘慧平, 朱启疆. 应用高分辨率遥感数据进行土地利用与覆盖变化监测的方法及其研究进展[J]. 资源科学, 1999, 21(3): 23-27.
- [20] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析: 以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 410-419.
- [21] 徐昕. 上海滨海地区景观格局与生态风险评价研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2008: 2-70.
- [22] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5020-5026.
- [23] 曾辉, 刘国军. 基于景观结构的区域生态风险分析[J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 454-457.
- [24] 高宾, 李小玉, 李志刚, 等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3441-3450.

(上接第 130 页)