

高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤形态发育评价

胡振琪¹, 李玲^{1,2}, 赵艳玲¹, 冯新伟²

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083;

2. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

摘要: 土壤的形态特征含有丰富的环境信息, 是环境变化与生态重建的重要依据, 可以推断土壤发育的强弱。矿山复垦土壤为人工新土壤, 可能构造出不同的土壤形态, 复垦土壤形态特征的研究对复垦土壤生产力的提高和复垦技术的革新具有重要意义。该文以高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤为研究对象, 探讨定量评价复垦土壤形态发育状况。研究采用实地调查和室内分析相结合的方法, 依据中国土壤系统分类用土壤剖面描述标准, 构建了复垦土壤形态发育评价体系, 进行土壤形态定量评价。结果表明, 形态发育指数 *HI* (土层发育指数) 和 *WPDI* (土壤权重剖面发育指数) 能够较好的反映复垦土壤与当地原状土壤的发育程度差异: 复垦土壤土层发育指数 *HI* 和土壤权重剖面发育指数 *WPDI* 平均值分别为 0.57、0.56, 而当地原状土壤 *HI* 和 *WPDI* 的平均值为 0.68、0.69, 表明复垦土壤形态发育程度相对较弱; *HI* 曲线形状异于原状土壤, 表层 *HI* 高于其他土层, 不同复垦方式的 *WPDI* 显示的发育程度序列为: 充填复垦(外源土) > 挖深垫浅 > 挖深垫浅(泥浆泵) > 充填复垦(粉煤灰、煤矸石等); 随复垦时间的延长, 复垦土壤发育程度呈现增长趋势。

关键词: 土壤, 复垦, 矿, 土壤形态发育评价, 土层发育指数, 权重剖面发育指数, 高潜水位平原区采煤塌陷地
doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.013

中图分类号: S151

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-05-0095-07

胡振琪, 李玲, 赵艳玲, 等. 高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤形态发育评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 95-101.

Hu Zhenqi, Li Ling, Zhao Yanling, et al. Morphology development evaluation of reclaimed soil in coal-mining subsidence areas with high groundwater levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 95-101. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国高潜水位平原矿区塌陷地中有 85% 以上为可耕地, 大面积的耕地破坏或退化, 采煤塌陷区的土地复垦是通过一系列的工程技术措施对土地进行挖、铲、垫、平等处理, 使之达到重新利用的目的^[1]; 复垦土壤成为土地复垦中最重要的研究对象。

国内外对矿区复垦土壤问题给予了极大关注, 并进行了大量研究。如 Potter K N, Belyaeva O N, Arshad M A, Shukla M K, Shrestha R K, Ussiri D N, Ma Y 等^[2-7]分别研究了矿区复垦土壤的水分特征、有机碳储存速率、理化性质、生物群落、从枝菌根等; 从 80 年代开始, 国内学者如于君宝、胡振琪、陈龙乾、温明霞、王煜琴、李新举、董霁红、龙健、毕银丽等的研究^[8-15]基本上涵盖了复垦土壤的基本理化性状、质量评价、重金属污染与评价、微生物修复等, 研究重点主要在提高和维护土壤的生产力

上, 一些研究成果已经得到应用。

国内外对于复垦土壤特征尤其是复垦土壤的部分理化性质(如容重、渗透率、有机质等)、养分状况以及环境质量等, 多集中于土壤表层、亚表层; 而针对复垦土壤的形态特征多是定性的描述, 主要用于辅助样点材料的说明, 尚无定量评价; 不同复垦方式、复垦时间对土壤形态和理化性质等的影响研究较少体现在复垦土壤全剖面上。

土壤形态特征能够推断土壤发育的强弱, 评价土壤发育程度和相对成土年龄, 因此可以作为土壤分类的指标^[16]。一些研究者选择一种或几种土壤形态特征指标, 将质性的描述转换为数值, 进行定量、分级进而评价, 用来区分土壤的发育程度, 应用于土壤发育和相对成土年龄研究。

目前量化土壤形态的发育评价中, 有单以颜色为主的颜色指数(color index), 如 Buntley^[17]、Hurst^[18]、Torrent^[19]等均按 Munsell 颜色描述方式, 将色彩、明度和彩度量化成单一数值。土壤剖面形态发育综合评价选择多项指标进行定量评价, 如 Bilzi 等在 C 层缺失或 C 层岩性不连接, 具有相似岩性的 C 层存在时土壤间发育比较研究中, 提出土

收稿日期: 2012-09-20 修订日期: 2013-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201209)

作者简介: 胡振琪(1963-), 男, 安徽五河县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地复垦与生态重建研究。北京 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 100083。Email: huzq@cumtb.edu.cn

层相对差异指数 RHD (relative horizon distinctness index) 和剖面相对发育指数 RPD (relative profile development index) [20], 选取的形态特征指标有颜色 (色调、彩度、明度)、质地、结构、润时的结持性、斑纹、黏粒胶膜、土层过渡等, 将这些特征各自的发育程度所得分值相加, 为 RHD 和 RPD 的指数值。土层间形态特征差异大, 则 RHD 值相差越大, RPD 值愈大表明土壤发育度高。Harden 在 Bilzi 等建立的土壤形态学评价指标基础上, 提出了剖面发育指数 PDI (profile development index) [21-22], 比较发育层与母质的差异。其计算与 RPD 大致相同, 与 RPD 指数一样, PDI 也用于在相似成土母质上发育的土壤间对比。应用 PDI 指数时, 对其组成特征可作相应的调整, 以获得最佳的指示效果, 并可绘制剖面发育深度图, 显示出剖面发育的程度。Birkeland 修正 Harden 指数, 提出权重剖面发育指数 WPDI (weighted profile development index) [23] 反应土壤发育差异。国内仅见黄成敏、龚子同、李迪华、王恩娟等对土壤形态有过定量的研究 [24-26]。

矿区土壤正遭受有史以来最为深刻持久的人为活动的影响, 破坏的矿区土壤经复垦活动演变成一种特殊的土壤——复垦土壤, 本质上是一种人为土壤或人造土壤 [27]。这种人为构造的复垦土壤剖面形态与未扰动土壤有很大的差别, 并与复垦方法有直接的关系, 直接影响复垦土壤的生产力和复垦工程的成败。因此, 本文对高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤的形态发育特征进行尝试性研究, 对复垦土壤生产力的提高和复垦技术的革新具有重要意义。

1 研究区域概况

研究区域主要位于山东省南部, 江苏省西部, 安徽省北部, 河南省东部之间的邹城市、徐州市、淮北市、宿州市、永城市及河南省中南部的平顶山市等煤炭资源丰富, 潜水位较高的区域, 地理坐标位于 $116^{\circ}21' \sim 117^{\circ}35'E$, $33^{\circ}57' \sim 35^{\circ}28'N$ 及 $113^{\circ}17' \sim 113^{\circ}25'E$, $33^{\circ}43' \sim 33^{\circ}51'N$ 。

研究区域煤炭资源丰富, 煤层赋存稳定, 开采技术条件简单, 适于机械化开采。如邹城市境内含煤面积 357 km^2 , 占全市总土地面积的 22.13%, 原煤储量达 41 亿 t 以上; 永城市含煤面积 716 km^2 , 原煤储量 31.6 亿 t 以上。

研究区域地处暖温带过渡型季风气候区, 四季分明, 水热同季, 有利于作物生长, 年均日照时数为 $2\ 200 \sim 2\ 500 \text{ h}$, 年均气温 $14.3 \sim 14.9^{\circ}\text{C}$, 日均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温为 $4\ 689.7 \sim 4\ 834.2^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $717.9 \sim 862.9 \text{ mm}$, 年平均无霜期 $202 \sim 220 \text{ d}$, 能满足作物两年三熟和一年两熟的热量要求。研究区域

土壤类型按照《中国土壤分类与代码》GB/T17296-2009 归属为半水成土纲 (H), 淡半水成土亚纲 (H2), 潮土土类 (H21), 典型潮土亚类 (H211) [28]; 母质多为冲积物, 土层深厚, 层次明显, 性质和流域上游土壤物质 (来源) 有关。

研究区域是中国主要的旱作土壤, 盛产粮棉; 研究区域处于黄淮海夏玉米区, 小麦、玉米一年两作制, 小麦、玉米单产已连续 10 a 超过 $15 \text{ t}/\text{hm}^2$, 而且优质粮棉种植面积不断扩大。

研究区域地貌类型多是山前倾斜平原或河流冲积平原, 地势平坦, 地下水位多在地表下 $1 \sim 4 \text{ m}$, 地下矿物的不断开采使地表发生下沉, 形成了塌陷漏斗、塌陷盆地等。采煤塌陷区的土地复垦是通过一系列的工程技术措施对土地进行挖、铲、垫、平等处理, 使之达到重新利用的目的。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

考虑人类活动对研究区域复垦土壤形成演变的影响, 选择不同区域、不同复垦方式的土壤进行野外调查和土壤剖面样品的采集, 同时采集周围未塌陷的原状土壤剖面样品。

研究区域中未扰动的土壤有 5 个, 分别在各小区内; 以挖深垫浅方式进行复垦的土壤剖面有 10 个, 其中 3 个是采用泥浆泵挖深垫浅, 7 个采用挖掘机、铲运车等机械进行的挖深垫浅复垦; 以充填方式复垦的土壤剖面有 8 个, 其中充填粉煤灰的 2 个, 充填煤矸石的 1 个, 充填外源土壤的 4 个, 充填外源土壤和煤矸石的 1 个 (见表 1)。

所有采样点都用 GPS 进行野外定位, 土壤剖面厚度 $130 \sim 150 \text{ cm}$ [29]; 并拍摄土壤剖面和景观照片。参照中国土壤系统分类用土壤剖面描述标准, 进行采样点剖面成土条件、形态特征等的定量描述, 包括气候、地形、母质、水文、(有效) 土层厚度、土地利用、地表特征等, 然后根据土壤剖面的物质组成、排列等划分土壤层次, 同时描述各土层、层次、深度、质地、结构、颜色、干润、过渡状态、侵入体、新生体 (斑纹、胶膜等)、根系、孔隙、土壤动物等的种类和丰度 [30]; 同时进行现场测试分析如石灰反应的测试、硬度的测试等, 同时按照土壤层次自下而上在土层中间用竹铲、竹片采集 1 kg 左右的样品放入密封塑料袋内。颜色的定量化主要为, 包括亮度、彩度和色值, 主要根据《中国标准土壤色卡》比色判定 [31]; 土壤质地野外判别采用 Shaw C W 的简易质地类型进行快速判定, 质地室内判别通过采集土壤分析样品, 进行颗粒组成 (激光粒度仪法) 分析 [32]。

表 1 剖面点基本情况
Table 1 Basic information of sample soil profile in research area

剖面号	北纬	东经	位置	复垦方式	复垦时间/年	种植时间/年	利用类型
1	35°25'05"	116°50'14"	山东省邹城市平阴寺镇北林村东	挖深垫浅	1998	1999	耕地
2	35°28'13"	11646'56"	山东省邹城市平阴寺镇平阴寺村西	挖深垫浅	2001	2003	林地
*3	35°26'51"	11649'19"	山东省邹城市平阴寺镇平阴寺村南				耕地
4	34°24'37"	11723'16"	江苏省徐州市贾汪区青山泉镇姚庄	充填复垦(粉煤灰)	2000	2001	林地
5	34°25'01"	11735'04"	江苏省徐州市贾汪区青山泉镇四清村	充填复垦(煤矸石)	2003	2003	耕地
*6	34°26'26"	11728'06"	江苏省徐州市贾汪区老矿办事处东				耕地
7	34°26'29"	11725'28"	江苏省徐州市贾汪区老矿办事处西	充填复垦(外源土)	2007		
8	34°26'17"	11725'30"	江苏省徐州市贾汪区泉旺头村西	挖深垫浅(泥浆泵)	2002	2003	耕地
9	33°58'59"	11651'02"	安徽省淮北市杜集区矿山集镇西	充填复垦(粉煤灰)	2004	2005	耕地
*10	33°57'38"	11649'52"	安徽省淮北市相山区任圩镇南				
11	33°57'43"	11650'33"	安徽省淮北市杜集相山区任圩镇东	挖深垫浅	2004	2005	耕地
12	34°10'36"	11657'28"	安徽省宿州市萧县龙城镇邵庄村	挖深垫浅(泥浆泵)	2004	2006	耕地
13	34°10'21"	11657'51"	安徽省宿州市萧县龙城镇孟楼村	挖深垫浅(泥浆泵)	2008		
14	33°54'56"	11635'09"	河南省商丘市永城市高庄镇葛店村	挖深垫浅	1998	2000	耕地
15	33°57'32"	11621'29"	河南省商丘市永城市城厢乡刘岗村	挖深垫浅	2008		
16	34°02'26"	11623'53"	河南省商丘市永城市陈集镇陈四楼村	挖深垫浅	2008		
17	34°14'37"	11623'47"	河南省商丘市永城市陈集镇陈小楼村	挖深垫浅	2007	2008	耕地
*18	34°06'39"	11621'25"	河南省商丘市永城市高庄镇王庄村				耕地
19	33°45'03"	11323'25"	河南省平顶山市东高皇乡辛南村	充填复垦(外源土)	2005	2007	耕地
20	33°51'16"	11317'33"	河南省平顶山市东高皇乡辛北村	充填复垦(外源土、煤矸石)	2004	2005	耕地
21	33°45'17"	11325'48"	河南省襄城县湛北乡南武湾村北	充填复垦(外源土)	2004	2007	耕地
22	33°43'43"	11324'39"	河南省襄城县湛北乡南武湾村南	充填复垦(外源土)	2007		耕地
*23	33°43'03"	11325'06"	河南省平顶山市东高皇乡任寨村北				耕地

注：*为未复垦的原状土壤，下同。

Note: * is the undisturbed soil without reclamation, the same below.

2.2 复垦土壤形态发育评价

借鉴土壤发育指数的方法，在构建复垦土壤形态发育指标体系时，注意所选土壤形态特征指标尽量反映剖面的土壤发育状况，与所选剖面的土壤发生及成土环境密切相关，保留了颜色（干、润）、质地、结构、结持性、土层边界、侵入体等指标，并在前人研

究的基础上进行量化赋分（见表 2），构建复垦土壤形态定量评价体系，计算复垦土壤各土层发育指数 *HI* (horizon index) 和权重剖面发育指数 *WPDI* (weighted profile development index)，用来尝试辨别复垦土壤发育差异，建立复垦土壤发育相对时间序列，探索复垦土壤发育状况的定量表达和评价。

表 2 土壤形态发育评价指标体系及赋分
Table 2 Soil morphological development evaluation factor system and its value

	数值	2.5YR	5YR	7.5YR	10YR					
色调	数值	10	30	50	70					
	赋分									
颜色 X_1	彩度	数值	1	2	3	4	5	6	7	8
	赋分	10	20	30	40	50	60	70	80	
	明度	数值	1	2	3	4	5	6	7	8
	赋分	80	70	60	50	40	30	20	10	
$X_1=(\text{色调}+\text{彩度}+\text{明度})_{\text{润}}+(\text{色调}+\text{彩度}+\text{明度})_{\text{干}}$										
质地 X_2	类型	砂质	砂壤	壤质	粉壤	黏壤	黏土(含黏粒胶膜)			
	赋分	10	20	30	40	50	60			
结持性 X_3	黏结性	无黏	稍黏	黏着	极黏	可塑性	无塑	稍塑	中塑	强塑
	赋分	10	20	30	40	赋分	10	20	30	40
$X_3=\text{黏结性}+\text{可塑性}$										
结构 X_4	形状	屑粒	团块	团粒	块状	发育	无	弱	中等	强
	赋分	10	20	30	40	赋分	0	10	30	50
$X_4=\text{形状}+\text{发育程度}$										
侵入体 X_5	体积	>30%	10-30%	<10%	无					
	赋分	0	10	30	50					
土层边界 X_6	明显度	模糊	渐变	清晰	突变	过渡	间断	不规则	波状	平滑
	赋分	10	20	30	40	赋分	10	20	30	40
$X_6=\text{土层明显度}+\text{土层过渡形式}$										

注：YR为《中国标准土壤色卡》芒塞尔颜色标记中的色调。

Note: YR is the color hue of Munsell color system in China standard soil color[M].

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i / X_{imax})}{n} \quad (1)$$

$$WPD I = \frac{\sum HI \cdot d}{Pd} \quad (2)$$

其中, HI 为某一土层的土壤形态发育指数值; X_i 为该层某土壤形态特征的赋分值; X_{imax} 为该特征的可能最大赋分值; n 为所选指标数; $WPD I$ 为权重剖面形态发育指数; d 为某土层厚度; Pd 为整个剖面的深度。

3 结果与讨论

3.1 复垦土壤形态发育指数

根据前述形态发育评价指标体系和相应所赋分值及计算公式, 对复垦土壤形态进行量化, 将剖面中各层次的土壤发育指数值量化, 即用 HI 反映各层的土壤发育程度, 用 $WPD I$ 反映复垦土壤剖面的发育程度, 并对各层 HI 进行绘图以直观反映复垦土壤各土层发育相对程度 (见图 1)。

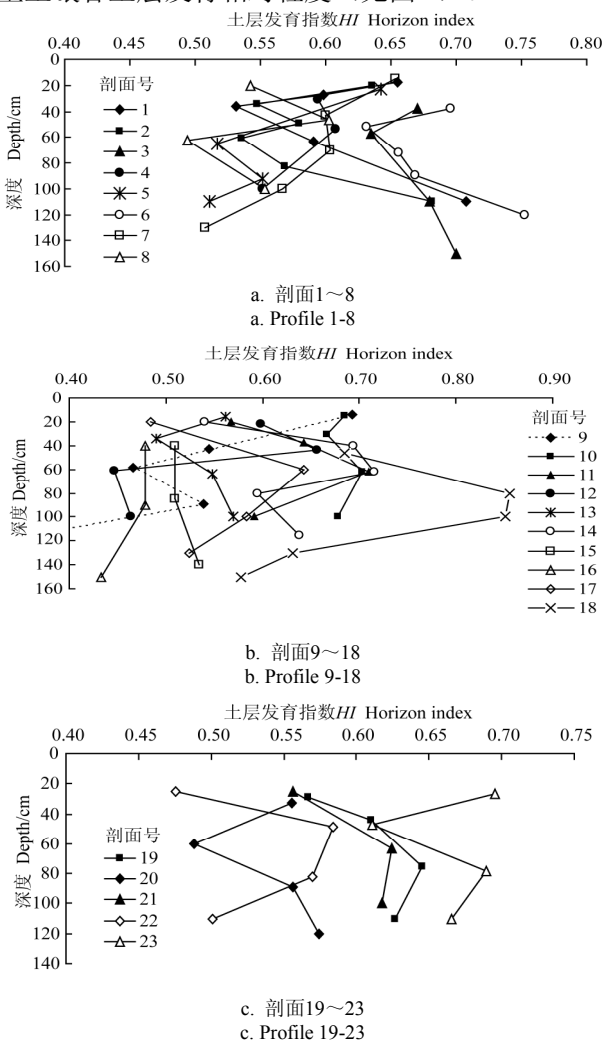


图 1 土壤剖面土层发育指数 HI 分布

Fig.1 Vertical distribution of horizon index in soil profile

由以上计算结果可以看出, 高潜水位平原区原土壤多是潮土, 母质多为河流冲积物, 土层边界、质地、结构等分异较为明显, 土层发育指数 HI 较高, 但各层间规律不明显; 复垦土壤土层发育指数 HI 平均 0.57, 而原状土壤相应土层 HI 平均值 0.68, 显示了其为人为扰动的土层的形态发育程度低于原状土壤的趋势; 而且复垦土壤 HI 与当地原状土壤剖面比较, 其形状相似程度极小, 显示了复垦土壤发育过程与原状土壤的发育过程可能截然不同; 复垦土壤表层 HI 普遍高于其他各层, 但复垦时间较短或未种植的土壤剖面其表层 HI 相对较低, 主要原因可能是复垦后进行农业种植、耕作培肥等使其发育程度相对较高。

复垦土壤形态权重剖面发育指数 $WPD I$ 平均值为 0.56, 普遍小于当地原状土壤 $WPD I$ 平均值 0.69; 如当地未复垦扰动的耕作土壤剖面 3、剖面 6、剖面 10、剖面 18、剖面 23 的权重剖面发育指数 $WPD I$ 均在 0.67 以上, 而复垦土壤的权重剖面发育指数 $WPD I$ 均在 0.65 以下 (见图 2), 也表明了其形态上总体发育程度较弱。

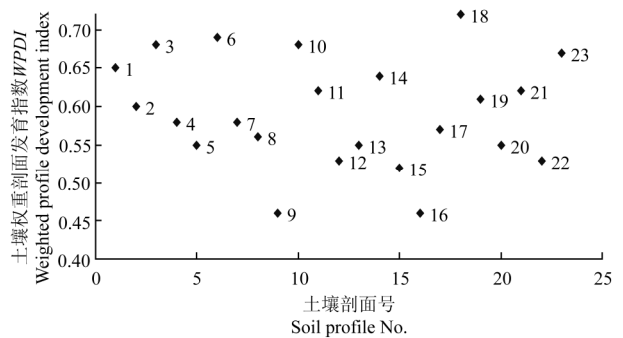
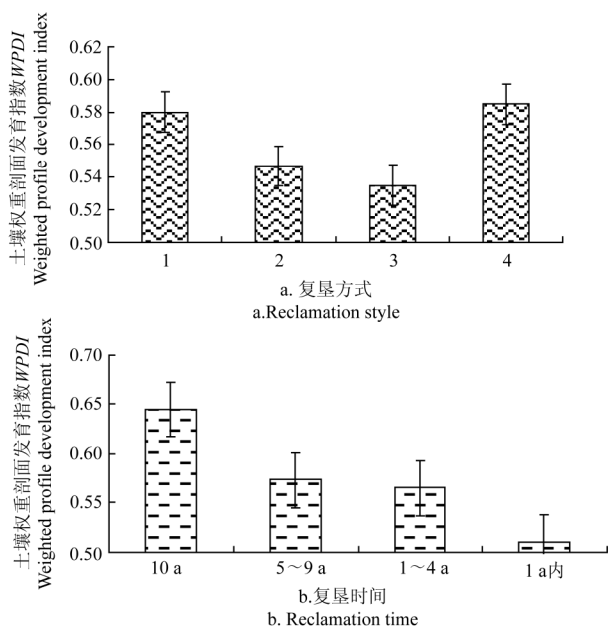


图 2 土壤权重剖面发育指数

Fig.2 Weighted profile development index

3.2 复垦土壤形态发育影响因素

复垦土壤权重剖面发育指数 $WPD I$ 受复垦方式、复垦时间、种植时间等的影响。不同复垦方式的权重剖面发育指数 $WPD I$ 表现的发育程度序列为: 充填复垦 (外源土) > 挖深垫浅 > 挖深垫浅 (泥浆泵) > 充填复垦 (粉煤灰、煤矸石等) (见图 3)。主要原因是以外源土进行充填复垦时土壤的结构、形态性质等变化不大, 因此其形态发育指数和原状土壤比较差别不大; 挖深垫浅是用当地土壤进行复垦, 改变较多的是土层的排列、土层过渡以及土壤结构等, 其他形态性质变化也较小; 而泥浆泵可能在土壤层次性质、土壤结构、土壤颜色等形态特征的人为扰动更大, 程度更强; 充填复垦 (粉煤灰、泥浆泵) 则是因充填不同量的人为物质对土壤形态的影响很大。



注：复垦方式中1为挖深垫浅 Digging deep to fill shallow by excavators; 2为挖深垫浅(泥浆泵) Digging deep to fill shallow by hydraulic dredge pump; 3为充填复垦(粉煤灰, 煤矸石等) Filling reclamation with fly ash or coal wastes; 4为充填复垦(外源土) Filling reclamation with exogenous soil.

图3 复垦土壤 WPDI 分布

Fig.3 Distribution of weighted profile development index

图3还表明了复垦土壤随复垦时间的延长,其权重剖面发育指数 WPDI 呈现增长趋势,复垦10a年以上的土壤其权重剖面发育指数 WPDI 已经接近原状土壤,如剖面1和剖面14;复垦5~10a年和复垦1~5a年的土壤 WPDI 差别不明显;复垦1a年以内的 WPDI 相对很低,主要是其土层相对分异性较差、土壤结构被打破,土壤相对发育程度较低。

尽管随复垦时间的延长 WPDI 有增长的趋势,但 WPDI 与复垦时间的相关性并不大(见图4),主要是因为采样剖面中不同复垦时间中存在不同的复垦方式,如上所述不同的复垦方式也影响着 WPDI,因此,应在未来的研究中可以扩大采样范围,以期获取复垦土壤复垦时间和 WPDI 的相关性研究,为复垦土壤发育预测提供依据。值得注意的是复垦土壤形成时间较短,发育至一定程度后可能更易受外界条件变化的影响。

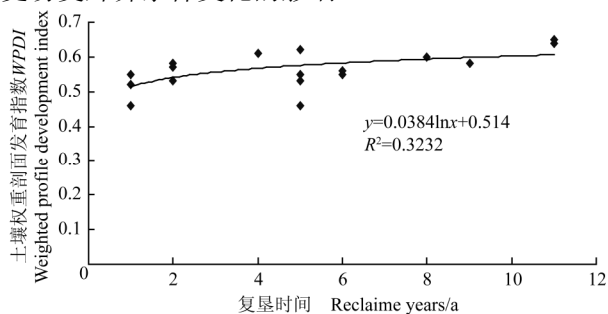


图4 不同复垦时间的复垦土壤 WPDI

Fig.4 WPDI of soil profile at different time

4 结论

针对复垦土壤构建形态定量评价指标体系,计算土层发育指数 HI 和权重剖面发育指数 WPDI,评价结果显示:复垦土壤土层发育指数 HI 平均 0.57,基本低于原状土壤相应土层 HI 平均值 0.68,显示了其为人为扰动的土层的形态发育程度低于原状土壤;而且复垦土壤与原状土壤 HI 曲线形状相似度极小,显示了复垦土壤发育过程与原状土壤的发育过程可能截然不同;复垦土壤表层 HI 普遍高于其他各层,但复垦时间较短或未种植的土壤剖面其表层 HI 相对较低。复垦土壤形态权重剖面发育指数 WPDI 平均值为 0.56,普遍小于当地原状土壤 WPDI 平均值 0.69,也表明了其形态总体发育程度较弱;不同复垦方式的发育程度序列为:充填复垦(外源土) > 挖深垫浅 > 挖深垫浅(泥浆泵) > 充填复垦(粉煤灰、煤矸石等);随复垦时间的延长,复垦土壤发育程度呈现增长趋势。

[参考文献]

[1] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策[J]. 能源环境保护, 2003, 17(3): 1-7.
Hu Zhenqi, Wei Zhongyi. Existing problems and countermeasures on mining and land reclamation in mine area[J]. Energy Environmental Protection, 2003, 17(3): 1-7. (in Chinese with English abstract)

[2] Potter K N, Carter F S, Doll E C. Physical properties of constructed and unconstructed soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(5): 1435-1438.

[3] Belyaeva O N, Haynes R J. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(21): 5203-5209.

[4] Shukla M K, Rattan L, Underwood J, et al. Physical and hydrological characteristics of reclaimed Minesoils in Southeastern Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1352-1361.

[5] Shrestha R K, Rattan L. Land use impacts on physical properties of 28 years old reclaimed mine soils in Ohio[J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 249-260.

[6] Akala V A, Lat. R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed mine soils in Ohio[J]. J Environ Qual, 2001, 30(2): 2098-2104.

[7] Ma Y, Dickinson N M, Wong M H. Beneficial effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on establishment of leguminous trees on Pb/Zn mine tailings[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1403-1412

[8] 于君宝, 刘景双, 王金达, 等. 矿山复垦土壤典型元素时空变化研究[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 235-239.
Yu Junbao, Liu Jingshuang, Wang Jinda, et al. The space-time variation of the typical elements content in

- covering soil of coal mine reclamation area[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(3): 235—239. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈龙乾, 邓喀中, 唐宏. 矿区泥浆泵复垦土壤物理特性的时空演化规律[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 277—283. Chen Longqian, Deng Kazhong, Tang Hong. Law of temporal and spatial evolution of physical properties of soil reclaimed by hydraulic dredgepump in mining area[J]. *Acta pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 277—283. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王煜琴, 李新举, 胡振琪, 等. 煤矿区复垦土壤压实时空变异特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 29(5): 223—227. Wang Yuqin, Li Xinju, Hu Zhenqi, et al. Spatial-temporal variability of reclamation soil compaction in coal mine region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 29(5): 223—227. (in Chinese with English abstract)
- [11] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区废弃地土壤微生物及生化活性的初步研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 496—503. Long Jian, Huang Changyong, Teng Ying, et al. Preliminary study on soil microbes and soil biochemical activities in mining wasteland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 496—503. (in Chinese with English abstract)
- [12] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 2068—2071. Bi Yinli, Wu Fuyong, Wu Yukun. Application of arbuscular mycorrhizas in ecological restoration of areas affected by coal mining in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2068—2071. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 276—280. Li Xinju, Hu Zhenqi, Li Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(6): 276—280. (in Chinese with English abstract)
- [14] 董霁红, 王莹. 煤矿塌陷地废渣充填复垦土壤理化性质研究[J]. *矿业研究与开发*, 2008, 28(1): 68—70. Dong Jihong, Wang Ying. Study on the physical and chemical properties of reclaimed soil filled with waste residue in mine subsidence area[J]. *Mining Research and Development*, 2008, 28(1): 68—70. (in Chinese with English abstract)
- [15] 温明霞, 邵明安, 周蓓蓓. 马家塔露天煤矿复垦区不同土地利用类型的土壤水分入渗过程研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 59—63. Wen Mingxia, Shao Ming'an, Zhou Beibei. Study on soil water infiltration processes in different land use types in majiata reclaimed regions[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [16] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 15—69.
- [17] Buntley G J, Westin F C. A comparative study of developmental color in a Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence[J]. *Soil Science Society of American Proceeding*, 1965, 29(19): 579—582.
- [18] Hurst V J. Visual estimation of iron saprolite[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1977, 88(1): 174—176.
- [19] Torrent J, Schwertmann U. Influence of hematite on the color of red beds[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986, 57(4): 682—686.
- [20] Bilzi A F, Ciolkosz E J. A field morphology rating scale for evaluating pedological development[J]. *Soil Science*, 1977, 124(1): 45—48.
- [21] Harden J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in Central California[J]. *Geoderma*, 1982, 28(1): 1—28.
- [22] Harden J W. Soil development on stable landforms and implications for landscape studies[J]. *Geomorphology*, 1990, 3(8): 391—398.
- [23] Birkeland P W. *Soils and geomorphology*[M]. New York: Oxford Univ. Press, 1984: 2—35.
- [24] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发育过程的定量研究[J]. *地理科学*, 2000, 20(4): 337—342. Huang Chengmin, Gong Zitong. Quantitative studies on genesis of soils derived from basalt in northern Hainan Island[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4): 337—342. (in Chinese with English abstract)
- [25] 黄成敏, 龚子同. 土壤发生和发育过程定量研究进展[J]. *土壤*, 2000(3): 145—150. Huang Chengmin, Gong Zitong. Quantitative studies on soil genesis and development[J]. *Soils*, 2000(3): 145—150. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李迪华. 土壤描述标准化和量化的实践[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2000, 36(6): 813—818. Li Dihua. Practice of Standardization and quantification of soil description[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(6): 813—818. (in Chinese with English abstract)
- [27] 龚子同, 张甘霖. 人为土壤形成过程及其在现代土壤学上的意义[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 184—191. Gong Zitong, Zhang Ganlin. Anthropogenesis and its significance in modern pedology[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 184—191. (in Chinese with English abstract)
- [28] 中华人民共和国标准. 中国土壤分类与代码 GB/T17296-2009 [S]. 2009: 69—70. National Standard of the People's Republic of China, Classification and code for Chinese soil GB/T17296-2009[S]. 2009: 69—70.
- [29] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤系统分类土族与土系建立原则与标准[R]. 2012, 5. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Principles and criteria for establishment of soil family

- and soil series of Chinese Soil Taxonomy[R]. 2012, 5. (in Chinese with English abstract)
- [30] 中国科学院南京土壤研究所. 野外土壤描述与采样手册[R]. 2009: 4—28. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Field guidelines for describing and sampling Soils[R]. 2009: 4—28. (in Chinese with English abstract)
- [31] 中国科学院南京土壤研究所, 中国科学院西安光学精密机械研究所. 中国标准土壤色卡[M]. 南京: 南京出版社, 1989.
- [32] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 1.

Morphology development evaluation of reclaimed soil in coal-mining subsidence areas with high groundwater levels

Hu Zhenqi¹, Li Ling^{1,2}, Zhao Yanling¹, Feng Xinwei²

(1. *Research Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;* 2. *Resource and Environment College, He'nan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract: Soil morphological characteristics contain abundant environmental information. It is an important basis for environmental change and ecological reconstruction and can be used to infer the strength of soil development. Reclaimed soil is man-made new soil and its morphological characteristics are related to reclamation methods, which is significant for renovating reclamation technologies and improving reclaimed soils. This paper involved conducted research on soil morphological characteristics and its evaluation method of soil morphological development for reclaimed soils in coal-mining subsidence areas with high groundwater level, which were reclaimed by four-type reclamation methods. These methods included digging deep to fill shallow areas by excavators, digging deep to fill shallow areas by use of a hydraulic dredge pump, filling reclamation with exogenous soil and filling reclamation with fly ash or coal wastes.

The quantitative evaluation of the morphology development of reclaimed soil in coal-mining subsidence areas with high groundwater level was done by a field investigation of 23 soil profiles and indoor analysis. The evaluation indicators and model were constructed based on the soil profile description standard of Chinese Soil Taxonomy (3rd edition, 2001). A soil morphology development evaluation index system was constructed to quantitatively measure the development degree of reclaimed soils. This evaluation index system combined features with six soil morphological properties based on morphological systematic observation and description for each layer soil. These six morphological properties are: color (hue, value and chroma), texture type, consistence (stickiness and plasticity), structure type, soil intrusions and horizon boundary (visibility and transition). On the basis of these indicators, the HI(horizon index) and WPDI (weighted profile development index) were developed preliminarily. The study then tried to research the reclaimed soil development status with a simple quantitative method.

The results show that the horizon index (HI) and the weighted profile development index (WPDI) can reflect the difference of soil development degree between reclaimed soils and local original undisturbed soils. The HI and WPDI average values of reclaimed soil are 0.57, 0.56, and the values of local original undisturbed soil are 0.68, 0.69, which shows that the reclaimed soil formation development level is relatively weak. The HI shape of reclaimed soil significantly different from local original undisturbed soil, which indicates the different forming and developmental process between them, and the surface layer HI general higher than other soil layer, which indicates the reclaimed soil as still in a weaker development phase. The development degree sequence of reclaimed soil based on WPDI reveals that: filling reclamation with exogenous soil > digging deep to fill shallow by excavators > digging deep to fill shallow by hydraulic dredge pump > filling reclamation with fly ash or coal wastes. With the reclamation time extension, the soil morphology development degree presents a growth trend. The resulting soil morphology development evaluation system is probably a convenient and effective method to evaluate the pedologic development degree of reclaimed soil in the field of coal-mining subsidence areas with high groundwater levels.

Key words: soils, reclamation, mines, soil morphology development evaluation, horizon index, weighted profile development index, coal-mining subsidence areas with high groundwater level