

DOI: 10.11766/trxb201804120177

南方丘陵区不同母质水耕人为土发育速率的比较*

韩光中¹ 谢贤健¹ 李山泉^{2†}

(1 内江师范学院地理与资源科学学院, 土壤过程模拟实验室, 四川内江 641112)

(2 邢台学院资源与环境学院, 河北邢台 054001)

摘要 如何度量水耕人为土的发育程度和发育速率是土壤发生学的一个难题。选择南方丘陵区 3 种常见母质 (紫色砂页岩类坡积物 PS、第四纪红黏土 RC 和红砂岩类坡积物 RS) 发育的水耕人为土时间序列作为研究对象, 尝试利用属性距离和土壤发育指数来表征水耕人为土的发育程度, 揭示母质对水耕人为土发育速率的影响。结果表明, 水耕人为土剖面形态特征经定量后和属性距离一样能够表征水耕人为土发育的时间趋势, 在指示水耕人为土的发育程度和估算发育速率上有重要意义。有机碳 (SOC)、pH、黏粒含量和磁化率 (MS) 在计算发生层距离 (HD) 中贡献很大, 而土壤颜色和湿结持性在计算发生层指数 (HI) 中起着重要作用。RC 母质的土壤, 土层较厚, 颜色红, 黏粒含量较高, 保肥和保水状况好, 土粒的黏结性和可塑性较好, SOC 容易累积, 发育速率最快。PS 母质的土壤, 土层较厚, 细颗粒 (黏粒+细粉粒, <0.01mm) 含量高, 保肥和保水状况好, 土粒有一定的黏结性和可塑性, SOC 容易累积, 发育速率次之。RS 母质的土壤, 黏粒和细颗粒含量均很低, 土层薄, 保肥和保水状况以及黏结性和可塑性差, SOC 很难累积, 发育速率最慢。母质对水耕人为土发育过程的影响可以通过影响其发育速率表现出来。研究同时显示, 水耕人为土平均发育速率远较自然土壤快, 并在人为培育下快速定向发育。但随着种稻年限的增加, 水耕人为土的发育速率普遍下降, 水耕人为土发育速率和成土年龄的关系大致符合对数关系。这种定量方法可以提高对水耕人为土形成过程的理解并能实现不同地区水耕人为土发育速率的定量比较, 有较好的使用前景。但此方法仍处于试验探讨阶段, 有待更多的研究来验证和改进。

关键词 水耕人为土; 时间序列; 母质; 属性距离; 土壤发育指数

中图分类号 S151⁺.3 **文献标识码** A

水耕人为土 (水稻土) 是我国最重要的土壤资源之一。作为重要的粮食生产基地^[1]与有机碳 (SOC) 库^[2-3]及温室气体——CH₄的重要排放源^[4-5], 其发生和演变过程对土壤管理有重要的意义, 因而受到了广泛的关注^[6-10]。成土母质作为土壤形成的物质基础对土壤的理化性质具有重要的

影响^[11]。虽然不同母质起源的土壤经过一定时间的水耕熟化后均可以发育为水耕人为土, 但母质不同很可能会导致其发育速率和演变特征存在一定的差异。因此母质如何影响水耕人为土的发育速率和演变特征是人为土研究中一个值得探讨的问题。中国土壤系统分类作为定量化的分类系统, 采用可测

* 国家自然科学基金项目 (41401235) 和气象灾害预测预警与应急管理研究中心开放基金项目 (ZHYJ16-YB03) 资助
Supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41401235) and An Open Fund of the Center of Forecasting and Emergency Management of the Meteorological Disasters (No. ZHYJ16-YB03)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: li-9yuyan@163.com

作者简介: 韩光中 (1981—), 男, 山东费县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤发生与土壤退化研究。E-mail: hanguangzhong@163.com

收稿日期: 2018-04-12; 收到修改稿日期: 2018-07-16; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-09-20

定的指标定义了水耕人为土并与其起源土壤进行区分。这从根本上解决了水耕人为土与起源土壤之间的界线问题，对研究水耕人为土发生有利，但如何度量水耕人为土的发育程度和发育速率仍是土壤发生学的一个难题。在最初的研究中，主要利用水耕熟化程度来反映水耕人为土的发育程度^[12]。实际上水耕人为土发生包括了两个相互矛盾的过程，即水耕熟化和水耕淋溶过程。水耕熟化使土壤肥力正向发展，而强烈的水耕淋溶使土壤肥力衰退。水耕人为土的发育是这两个过程共同作用的结果（特定条件下还有一些附加过程，如潜育化过程等）。因此，从土壤发生学角度而言，水耕熟化过程并不完全等同于水耕人为土的发育过程。当前亟需引入一些定量指标来衡量水耕人为土的发育速率和发育程度。相比较而言，基于土壤理化性质的属性距离^[13]和基于形态特征的土壤发育指数^[14-17]等指标在表征土壤发育程度上有独特的优势。这些指标能够综合反映土壤理化性质和土壤形态特征的变化，并排除了单个土壤属性用于指示土壤发育程度时的不确定性。为此，本研究选择南方丘陵区3种常见母质发育的水耕人为土时间序列为研究对象，尝试利用属性距离和土壤发育指数来表征水耕人为土的发育程度，揭示母质对水耕人为土发育速率的影响，

以期今后的水耕人为土发生学研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取我国亚热带地区3种母质发育的水耕人为土从十年到百年尺度的时间序列（表1），分别为发育于广西龙胜各族自治县（龙脊梯田）紫色砂页岩坡积物的水耕人为土时间序列（PS10，0 a；PS11，30 a；PS12，100~300 a；PS13，300 a）、发育于江西省进贤县第四纪红黏土的水耕人为土时间序列（RC10，0 a；RC11，100 a；RC12，100~300 a；RC13，300 a）和发育于江西省余江县红砂岩坡积物的水耕人为土时间序列（RS10，0 a；RS11，30 a；RS12，60~200 a；RS13，200 a）。研究区属亚热带季风气候，年均气温分别为18.2、17.3和17.6℃，年均降水量分别为1 557、1 549和1 789 mm。3个研究区的年均气温和降水量相差不大，本研究认为其气候条件基本一致，不再单独讨论。3种母质发育的水耕人为土时间序列建立和判定的依据分别见文献[18]，采样点信息见表1，剖面照片见图1。土壤类型的判别主要基于文献[19]。

表1 剖面基本信息

Table 1 Descriptions of the studied soil profiles

母质 Parent materials	剖面编号 ID	位置 Locations	利用方式 Land use	种稻年限	坡度	海拔	土壤类型 Soil type
				Cultivation age /a	Gradients /°	Elevations /m	
紫色砂页岩 Purple sandy shale	PS10	坡顶 ^①	荒草地 ^④	0	23	1 104	酸性紫色湿润锥形土 ^⑦
	PS11	坡顶 ^①	双季稻 ^⑤	约30	23	1 099	水耕淡色潮湿锥形土 ^⑧
	PS12	坡中 ^②	双季稻 ^⑤	100~300	36	935	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
第四纪红黏土 Quaternary red clays	PS13	坡底 ^③	双季稻 ^⑤	约300	28	807	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RC10	坡顶 ^①	荒草地 ^④	0	<6	52	普通黏化湿润富铁土 ^⑩
	RC11	坡顶 ^①	油菜-水稻 ^⑥	约100	<6	45	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
红砂岩 Red sandstone	RC12	坡中 ^②	油菜-水稻 ^⑥	100~300	<6	34	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RC13	坡底 ^③	油菜-水稻 ^⑥	约300	<6	32	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RS10	坡顶 ^①	荒草地 ^④	0	<6	63	普通酸性湿润锥形土 ^⑪
	RS11	坡顶 ^①	油菜-水稻 ^⑥	约30	<6	48	水耕淡色潮湿锥形土 ^⑧
	RS12	坡中 ^②	油菜-水稻 ^⑥	60~200	<6	38	普通铁聚水耕人为土 ^⑨
	RS13	坡底 ^③	油菜-水稻 ^⑥	约200	<6	36	普通铁聚水耕人为土 ^⑨

① Top of the slope, ② Middle of the slope, ③ Bottom of the slope, ④ Wasteland, ⑤ Double rice, ⑥ Rice-rape rotation, ⑦ Aci-Pudic Cambisols, ⑧ Ans-Och-Aquic Cambisols, ⑨ Typ-Fec-Hydragric Anthrosol, ⑩ Typ-Arg-Udic Ferrisols, ⑪ Typ-Aci-Udic Cambisols

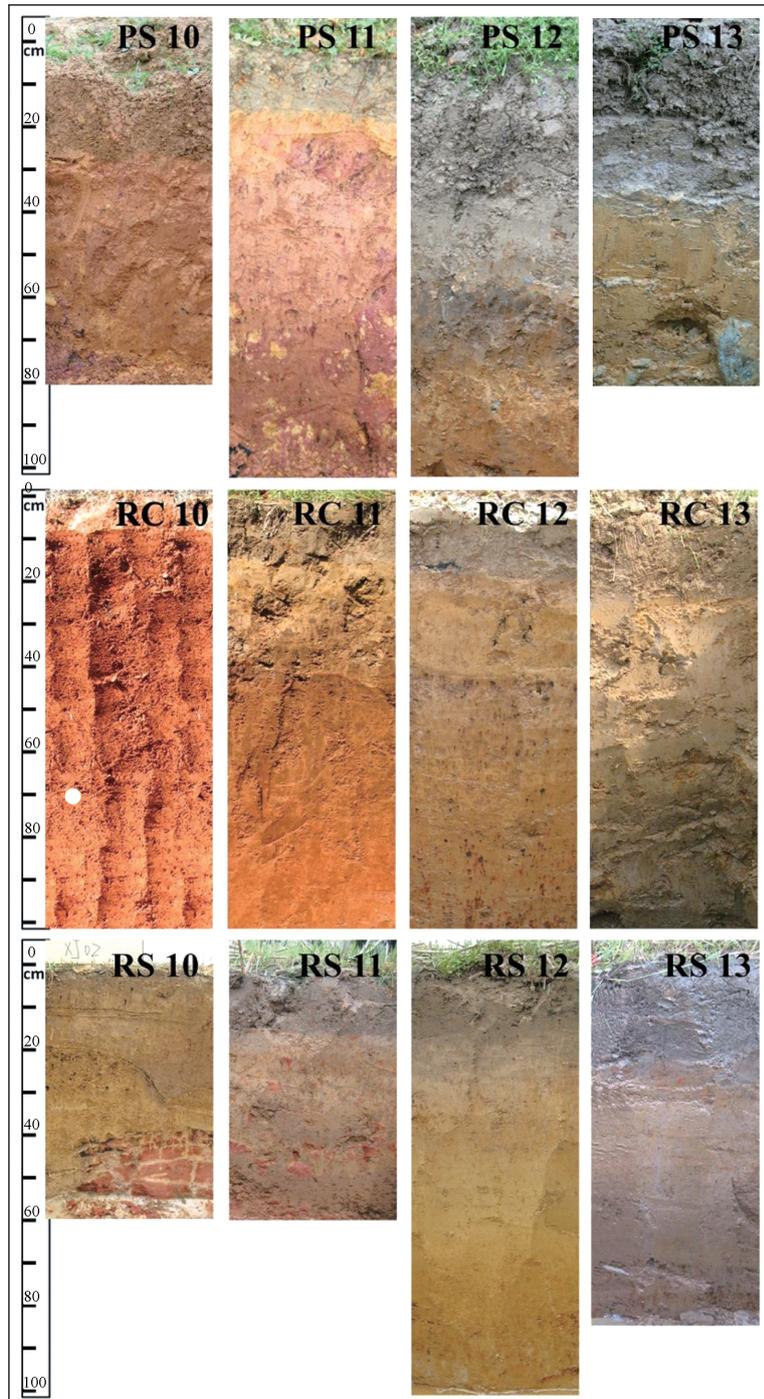


图1 不同母质水耕人为土时间序列的土壤剖面照片

Fig. 1 Soil profiles of Hydragric Anthrosols different in parent material and chronosequence

1.2 剖面描述与样品采集

结合史料分析与实地考察, 选取不同母质发育的水耕人为土时间序列典型土壤剖面, 按照土壤发生层采样法采集土样并描述土壤形态(包括土壤颜色、土壤结构和结持性等)^[20], 土壤颜色根据《中国标准土壤色卡》^[21]确定。所有

土样均在水稻收割排水后采集, 土壤剖面选在稻田的中心部位, 坡底剖面避开容易积水的洼地。土壤样品采集后在室内自然风干, 挑出枯枝落叶、根系和大2 mm的非土壤物质, 四等分法取土, 先后过10、60和100目的尼龙筛, 装好备用。

1.3 测定项目与分析方法

SOC采用重铬酸钾-外加加热法测定；pH（水土比2.5：1）采用电位法测定；土壤颗粒组成采用激光粒度仪测定；游离铁（ Fe_d ）采用连二亚硫酸钠-柠檬酸钠-重碳酸钠浸提（DCB），原子吸收光谱仪测定^[22]。磁化率（MS）的测定：称取适量（以装满为准）过10目筛的风干土样（精确度0.01 g），装入10 cm³无磁性塑料盒中，用MS-2B型磁化率仪（英国Bartington公司）分别在低频（0.47 kHz, MS_{lf} ）和高频（4.7 kHz, MS_{hf} ）磁场中进行测定，每个样品测定3次，最后取其平均值。

1.4 属性距离的计算

基于Carré 和 Jacobson^[13]提出的理论计算了水耕人为土剖面（剖面PS11和RS1为锥形土，下同）与起源土壤剖面间的发生层距离（Horizon distance, HD）。在计算HD时采取自上而下层次对应的方法^[13]。起源土壤与水耕人为土对应层次间的HD计算如式（1）和式（2）。

$$HD = D_h(h_a, h_b) / N \quad (1)$$

$$D_h(h_a, h_b) = \sum_{f=1}^N |v_{a,f} - v_{b,f}| \quad (2)$$

式中，HD为发生层距离， $D_h(h_a, h_b)$ 为发生层 h_a 与 h_b 的Manhattan距离，N为参与计算的土壤属性的个数， $v_{a,f}$ 与 $v_{b,f}$ 分别为发生层 h_a 与发生层 h_b 的某种土壤属性数值。本研究用于HD计算的土壤属性主要为在水耕人为土发育过程中有规律变化的黏粒、SOC、pH、 Fe_d 和MS共5个土壤属性，并在计算HD之前对土壤属性数据进行标准化，使所有的数据介于0~1之间。

考虑到土壤厚度对土壤肥力供应有一定的影响。因此本研究在计算剖面距离（Pedological distance, PDD）时，将土壤厚度考虑进去（剖面厚度取120 cm，不足120 cm的取实际值）。各土壤剖面PDD由该剖面各个发生层的HD值乘以该发生层的厚度后求和而得。

1.5 剖面发育指数的计算

基于Harden^[14]、Harden 和Taylor^[15]提出的理论，利用剖面描述特征计算土壤发育指数。首先对土壤各个发生层的描述数据进行赋值，接着计算

水耕人为土发生层各种赋值数据与起源土壤的差值（自上而下层次对应），然后标准化使所有数据介于0~1之间。每个发生层所有标准化后的形态属性取平均值得到该发生层的发生层指数（Horizon index, HI）。剖面每个发生层的HI值乘以该发生层的厚度后求和得到该剖面的发育指数（Profile development index, PDI）。标准化时各属性的最大值采用了Harden^[14]提出的最大理论数值，这样可以统一基准值，便于不同研究间的相互比较。选取红度指数、黑化指数、总质地、结构和湿结持性^[14]来计算土壤发育指数。由于采样时土壤均处于湿润状态，土壤的干结持性没有描述。已往的研究也表明由于形态属性内在的相关性，个别属性的缺失对结果的影响并不大^[14]。pH在计算属性距离时已经用到，为避免重复就未用于剖面发育指数的计算。

由于水耕人为土的发育过程和方向同自然土壤不同，各项描述数据在数值化时有各自的独特性，如：（1）种稻后土壤颜色的色调变黄，明度降低，土壤红度的赋值标准和自然土壤相反；（2）水耕人为土耕作层经常受到翻耕扰动及水耕熟化的影响，土壤结构和土壤湿结持性的发育方向与其他层次不同，因此采用了单独的标准进行赋值（*标记）。详细数值化过程如表2。

2 结果

2.1 土壤剖面形态和基本理化性质的演变特征

水耕人为土剖面较自然土壤剖面内部开始有不同程度的分异。主要表现为水耕表层（包括耕作层和犁底层）和氧化还原层的出现，坡底种稻年限长的水耕人为土剖面内部分异更明显。随着种稻年限的增加，土壤颜色的色调变黄，彩度降低。耕作层由于有机质（SOM）含量的提高土壤颜色的明度与彩度值降低，根系较多；犁底层变得愈加紧实（容重介于1.21~1.83 g·cm⁻³）；氧化还原层有较多的新生铁、锰斑纹或结核形成。这表明淹水种稻后土壤形态学特征发生一系列有规律的变化。PS母质起源土壤的色调为7.5 YR（干态，下同），种稻后逐渐向2.5 Y演化。该母质的土壤有轻度的可塑性和黏结性。RC母质起源土壤的色调为10 R，种稻后逐渐向5 YR演化。该母质土壤的可塑性和黏结性中等。RS母质起源土壤的色调为10 YR，种稻后逐渐向2.5 YR演化。该母质土壤的可塑性和黏

表2 剖面形态描述数据的数值化与形态属性的计算

Table 2 Quantification of profile descriptions and calculation of morphological properties

形态属性 Morphological properties	赋值与计算公式 Quantification of soil field properties	
红度指数 Rubification	赋值Quantification / 色调Hue 10 / 5Y←9 / 2.5Y←8 / 10YR←7 / 7.5YR←6 / 5YR←5 / 2.5YR←4 / 10R←3 / 7.5R←2 / 5R←1 / 2.5R	
黑化指数 Melanization	赋值Quantification / 彩度Chroma 8 / 1←7 / 2←6 / 3←5 / 4←4 / 5←3 / 6←2 / 7←1 / 8 红度指数Rubification = 10 [(Δ色调Hue) + (Δ彩度Chroma)] _{干/dry} + 10 [(Δ色调Hue) + (Δ彩度Chroma)] _{湿/moist}	
总质地 Total texture	赋值Quantification / 明度Value 8 / 1←7 / 2←6 / 3←5 / 4←4 / 5←3 / 6←2 / 7←1 / 8 黑化指数Melanization = 10 (Δ明度Value) _{干/dry} + 10(Δ明度Value) _{湿/moist}	
结构 Structure	按质地三角图趋向黏土的方向从1到12赋值Line crossing toward clay on textural triangle / 质地Texture 赋值Quantification / 黏性Cohearsiveness 1 / 无黏性Not cohearsive → 2 / 轻度黏性Slightly cohearsive → 3 / 黏Cohearsive → 4 / 极黏Very cohearsive 赋值Quantification / 可塑性Plasticity 1 / 不可塑Not plastic → 2 / 轻度可塑Slightly plastic → 3 / 可塑Plastic → 4 / 极可塑Very plastic 总质地Total texture = 10(Δ质地Texture) + 10(Δ黏性cohearsiveness) + 10(Δ可塑性Plasticity)	*耕作层适用 Suitable only for Ap1 赋值 Point 5 10 20 30 等级 Grade 1 2 3 类型 Type agg
湿结持性 Moist consistence	赋值Quantification / 结持性Consistence 1 / 疏松Loose→2/非常易碎Very friable→3/易碎Friable→4/紧实Firm→5/非常紧实Very firm→6/极紧实Extremely firm 赋值Quantificated point / 结持性Consistence *耕作层适用 Suitable only for Ap1 6/疏松Loose←5/非常易碎Very friable←4/易碎Friable←3/紧实Firm←2/非常紧实Very firm←1/极紧实Extremely firm 湿结持性Moist consistence = 10 (ΔMoist consistence)	

注: s = 强; m = 中; w = 弱; gr = 粒状; pl = 片状; pr = 棱柱状; col = 柱状; abk = 块状; sbk = 棱块状; agg = 团聚体 Note: s = strong; m = moderate; w = weak; gr = granular; pl = platy; pr = prismatic; col = columnar; abk = angular blocky; sbk = subangular blocky; agg = aggregate

结性极差。 随着种稻年限的增加也呈现了明显的变化。更详细的数据分别参见文献 [18] 和 [24] 。RC和RS母质 同样, 土壤黏粒、pH、SOC、Fe_d和MS等随

土壤种稻后黏粒含量逐步降低，基本呈现出随着种稻时间的增加而逐渐降低的趋势（图2）。PS母质土壤种稻后黏粒未有明显降低，剖面下部甚至有较明显的增加。PS、RC和RS母质水耕人为土的pH分别介于4.46~5.41、5.01~6.25和5.2~6.19，略高于起源土壤（分别介于4.65~4.91、4.55~5.35和4.56~5.54）。3种母质土壤种稻后pH均趋于中性，这和已有的研究结果一致^[1]。PS和RC母质土壤种稻后SOC的剖面分布规律相似：SOC含量均随土壤深度的增加而下降，水耕人为土耕作层的SOC含量均明显高于起源土壤；种稻年限较短的土壤与起源土壤相比，耕作层SOC含量增加明显，但耕作层以下增加不明显；种稻时间较长的土壤与起源土壤相比，SOC在下层也有较明显的增长。说明这两种母质土壤在种稻初期SOC的增加主要集中在耕作层，到一定阶段后，下层也表现出明显增加。相比之下，RS母质的起源土壤种稻后SOC没有明显增加，种稻年限较短的土壤的SOC含量甚至低于起源土壤，而种稻约200 a的土壤也未表现出较起源土壤有大幅度的增加。PS和RC母质起源土壤 Fe_d 的剖面分布相对均一，而RS母质起源土壤的剖面内部变异较大。种稻后 Fe_d 含量均逐渐降低，也基本表现出随着种稻时间的增加而逐渐降低的趋势。PS和RS母质起源土壤的MS值较低，种稻后演变规律类似，土壤上、下层呈明显分异（图2）。种稻后上层土壤的MS值明显降低，在较短的时间内（30 a内）就会降低到一个极低的数值，之后没有明显变化。种稻后下层土壤的MS值降低没有上层明显，种稻年限较短的土壤（PS11和RS11）有明显的增加（RS11的增加尤为明显）。RC母质起源土壤的MS值较高，种稻之后土壤上、下层也呈明显分异。上层土壤MS的演变规律与PS和RS母质上层土壤的演变规律类似。种稻后下层土壤的MS值虽然也下降，但下降幅度没有上层那么大。总体而言，随着种稻年限的加长，3种母质的水耕人为土最终发育成结构相似的MS剖面构型（MS值低且剖面均一）。

2.2 不同母质水耕人为土发育程度和发育速率的比较

发生层距离（HD）反映的是土壤各发生层理化性质的综合变化程度，而发生层指数（HI）反映的是土壤各发生层形态特征的综合变化程度，

值越大代表变化程度越大。两者从不同方面反映土壤发生层的发育程度。3种母质水耕人为土的HD与HI值大致呈现了随着种稻年限的增加而增加的趋势，这和水耕人为土的发育时间相符（图3）。说明水耕人为土发生层的发育程度可以通过HD与HI两个定量指标表现出来。上层土壤的HD与HI值通常较下部土层更高。说明种稻后上层土壤受人为水耕的影响较大，剖面内部逐渐分异。将HD或HI值和种稻年限的比值近似看作发生层的平均发育速率。通过不同母质种稻年限相近的水耕人为土之间的相互比较可知，RC母质水耕人为土的HD与HI值和种稻年限的比值通常较大，这说明RC母质水耕人为土发生层的发育速率要较PS母质与RS母质水耕人为土快。PS母质水耕人为土发生层的发育速率次之，RS母质最慢。RS母质种稻年限较长剖面（RS12和RS13）耕作层的HI值仍很低，说明RS母质不利于水耕人为土耕作层的发育。

PDD或PDI值是剖面理化性质或形态特征变化程度综合的度量，值越大代表该剖面理化性质或形态特征总体的变化程度越大。本研究中PDD和PDI值与已判定的土壤相对种稻年限十分吻合，可以用PDD和PDI值来表示水耕人为土整体的发育程度。将PDD或PDI值和种稻年限的比值近似看作整个剖面的平均发育速率。通过不同母质种稻年限相近的水耕人为土之间的相互比较可知，RC母质土壤的PDD和PDI值与种稻年限的比值最高，PS母质土壤次之，RS母质土壤最低。这表明RC母质水耕人为土的平均发育速率最高，PS母质水耕人为土的平均发育速率次之，RS母质水耕人为土的平均发育速率最慢。种稻年限短的土壤的HD和HI值与种稻年限的比值明显高于种稻年限比较长的土壤。这说明在种稻初期，土壤的发育速率较快（土壤的理化性质与形态特征的变化快），之后随着发育程度的加深，土壤发育速率变慢。

2.3 水耕人为土发育与土壤剖面形态特征和基本理化性质的相关关系

在过去的几十年里，大量土壤时间函数被提出，时间跨度几百年至几百万年不等，涉及了不同母质、不同气候下土壤的发育过程^[25-27]。其中一些研究认为土壤性质发育与时间成对数或指数关系^[25-26]。本研究表明土壤在种稻初期发育速率较

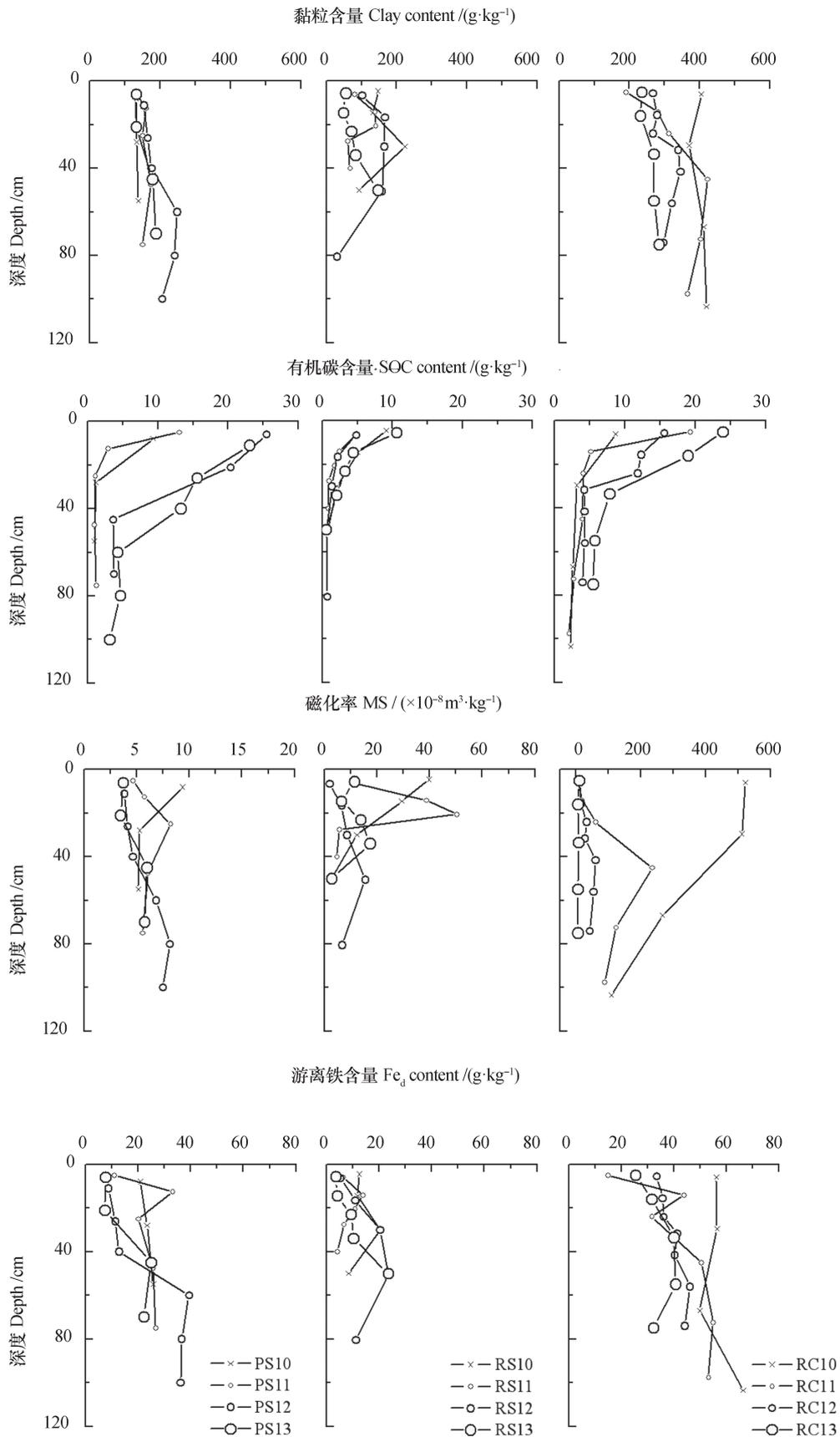


图2 不同母质水耕人为土时间序列基本理化性质的剖面分布

Fig. 2 Vertical distribution of basic soil physico-chemical properties in soil profiles of Hydragric Anthrosols different in chronosequence and parent material

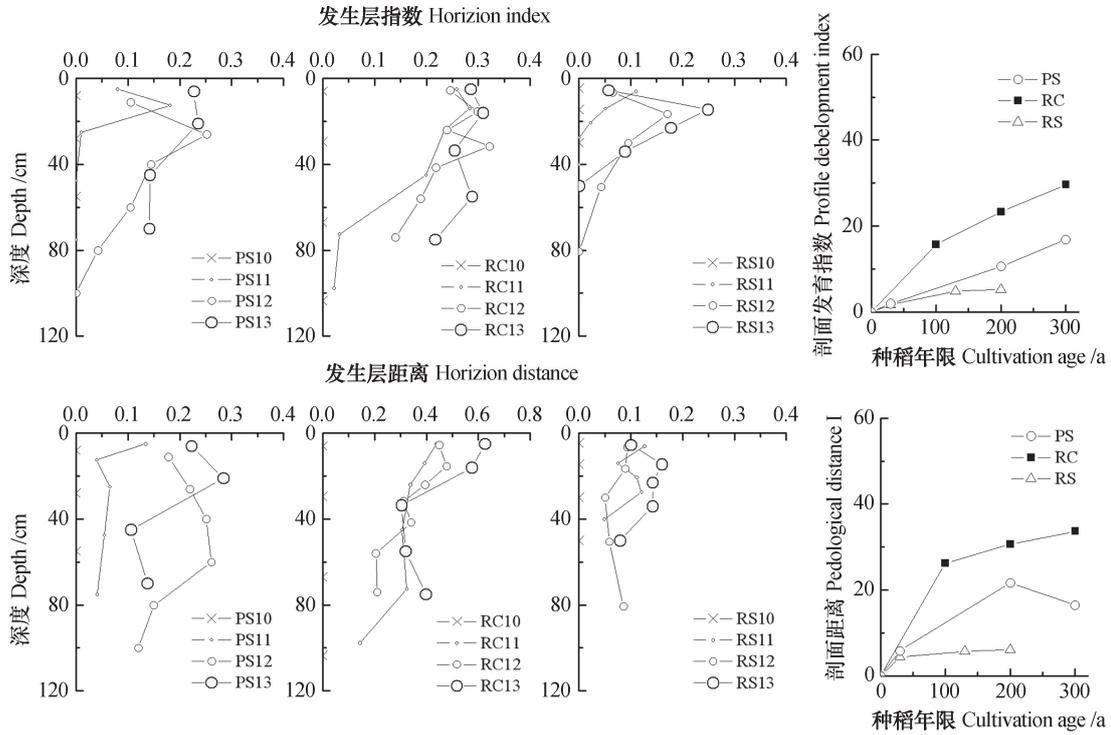


图3 不同母质水耕人为土时间序列属性距离和剖面发育指数的剖面分布

Fig. 3 Distribution of soil attribute distance and soil developmental indices in profiles of Hydragric Anthrosols different in chronosequence and parent material

快，以后随着发育程度的加深，发育速率变慢，水耕人为土发育速率和成土年龄的关系大致符合对数关系。

水耕人为土理化性质和形态特征的演变并不是完全孤立的两个过程，而是存在着千丝万缕的联系。水耕人为淹水状况对土壤铁锰氧化物的迁移转化非常重要。土壤淹水后，在SOC等因素的作用下，氧化铁发生溶解、螯合溶解与还原溶解等，以Fe²⁺进入土壤溶液。水溶性Fe²⁺扩散或下渗至犁底层下面的氧化区，分别以斑状、管状和结核状沉淀下来。铁的这种淋溶和淀积被认为是水耕人为土形成的重要特征之一^[1]。这一过程同时伴随了土壤理化性质的规律性变化，如Fe_d在剖面内部的迁移和再分配、SOC的积累、土壤酸碱度趋于中性和耕作层磁性矿物的衰竭等。将水耕人为土各发生层的HD与HI值做相关分析，发现二者呈极显著线性正相关(r = 0.759, n = 49, P < 0.01)，这进一步证实了水耕人为土理化性质与形态特征的演变之间存在密切联系。这也表明水耕人为土剖面形态特征经过定量后和理化性质(属性距离)一样能够表征水耕人为土发育的时间趋势，在指示水耕人为

土的发育程度和判定土壤相对种稻年限上有重要意义。

从表3可见 Fe_d、SOC、pH、MS均与HD值显著相关，表明它们在计算HD值中起着重要作用。红度指数与HI值的相关性最高，可以解释其变异的83.1%。其次是黑化指数和湿结持性。这表明土壤颜色和湿结持性在计算HI值中起着重要作用。种稻后上述理化性质和形态学特征相对容易变化的水耕人为土，其发育速率通常就快，反之，就慢。RC母质的土壤，土层较厚，颜色较红，黏粒含量较高，保肥和保水状况好，土粒的黏结性和可塑性较好，SOC容易累积，土壤结构体和水耕表层(耕作层和犁底层)容易发育。PS母质的土壤，土层较厚，黏粒含量虽然不高，但细颗粒(黏粒+细粉粒，<0.01mm)含量高(PS母质种稻的细颗粒平均含量高达56.7%)，保肥和保水状况好，土粒有一定的黏结性和可塑性，SOC容易累积，土壤结构体和水耕表层也容易发育。土壤发育速率低的RS母质的土壤，黏粒和细颗粒含量均很低(RS母质种稻的细颗粒平均含量为24.6%)，土层薄，保肥和保水状况以及黏结性和可塑性差，SOC很难累积，土壤结构体和水耕表层难发育。母质对水

表3 土壤的发育程度与土壤剖面形态学特征和基本理化性质的相关关系

Table 3 Relationships of soil development degree with soil profile morphology and basic soil properties

	游离铁 Fe _d	有机碳 SOC	pH	黏粒 Clay	磁化率 MS	红度指数 Rubification	黑化指数 Melanization	结构 Structure	湿结持性 MC	总质地 Total texture
游离铁Fe _d	1.00									
有机碳SOC	0.25	1.00								
pH	0.46**	0.34*	1.00							
黏粒Clay	0.41**	0.16	0.27	1.00						
磁化率MS	0.33*	0.36*	0.31*	0.50**	1.00					
红度指数 Rubification	0.36*	0.43**	0.63**	0.27	0.57**	1.00				
黑化指数 Melanization	0.35*	-0.03	0.33*	0.33*	0.57**	0.65**	1.00			
结构 Structure	-0.04	0.40**	-0.07	-0.12	0.04	0.11	-0.18	1.00		
湿结持性MC	0.25	0.62**	0.08	0.13	0.57**	0.34*	0.18	0.57*	1.00	
总质地Total texture	-0.01	0.24	0.09	-0.19	-0.18	-0.04	-0.33*	0.27	0.15	1.00
发生层指数 HI	0.37**	0.47**	0.50**	0.24	0.61**	0.91**	0.69**	0.39**	0.57**	0.08
发生层距离 HD	0.72**	0.46**	0.68**	0.65**	0.71**	0.68**	0.54**	-0.01	0.39**	-0.04

注: Fe_d: 游离铁; SOC: 有机碳; MS: 磁化率; MC: 湿结持性; HI: 发生层指数; HD: 发生层距离; *显著水平 $P < 0.05$, $n=49$; **显著水平 $P < 0.01$, $n=49$ Note: Fe_d: Free iron oxides; SOC: Soil organic carbon, MS: Magnetic susceptibility; MC: Moist consistence; HI: Horizion index ; HD: Horizion distance; * $P < 0.05$, $n=49$; ** $P < 0.01$, $n=49$

耕人为土发育过程的影响可以通过影响其发育速率表现出来。与已有的研究结果^[14-17,25-27]相比,水耕人为土的平均发育速率远较自然土壤快,并在人为作用下快速定向发育。这种新的定量方法可以提高对水耕人为土成土过程的理解并能实现不同地区水耕人为土发育速率的定量比较,有较好的使用前景。但这些方法仍处于试验探讨阶段,有待更多的研究进行验证和进一步改进。

3 结论

水耕人为土剖面形态特征经定量后和属性距离一样能够表征水耕人为土发育的时间趋势,在指示水耕人为土的发育程度和估算发育速率上有重要意义。SOC、pH、黏粒含量和MS在计算HD中贡献很大,而土壤颜色和湿结持性在计算HI中起着重要作用。RC母质的土壤,土层较厚,颜色红,黏

粒含量较高,保肥和保水状况好,土粒的黏结性和可塑性较好,SOC容易累积,发育速率最快。PS母质的土壤,土层较厚,细颗粒(黏粒+细粉粒,<0.01mm)含量高,保肥和保水状况好,土粒有一定的黏结性和可塑性,SOC容易累积,发育速率次之。RS母质的土壤,黏粒和细颗粒含量均很低,土层薄,保肥和保水状况以及黏结性和可塑性差,SOC很难累积,发育速率最慢。母质对水耕人为土发育过程的影响可以通过影响其发育速率表现出来。研究同时显示,水耕人为土平均发育速率远较自然土壤快,并在人为培育下快速定向发育。但随着种稻年限的增加,水耕人为土的发育速率普遍下降,水耕人为土发育速率和成土年龄的关系大致符合对数关系。

参考文献

- [1] 李庆远. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992

- Li Q K. Paddy soils of China (In Chinese) . Beijing: Science Press, 1992
- [2] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China' s paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10 (1) : 79—92
- [3] Pan G X, Li L Q, Zhang Q, et al. Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu Province, China, and the recent trend of carbon sequestration. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2005, 17 (1) : 1—7
- [4] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58 (1/3) : 259—276
- [5] Pathak H, Li C S, Wassmann R. Greenhouse gas emissions from India rice fields: Calibration and upscaling using the DNDC model. *Biogeosciences*, 2005, 2 (2) : 113—123
- [6] Zhang G L, Gong Z T. Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes. *Geoderma*, 2003, 115 (1/2) : 15—29
- [7] Cheng Y Q, Yang L Z, Cao Z H, et al. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. *Geoderma*, 2009, 151 (1/2) : 31—41
- [8] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (5) : 1807—1820
- [9] 韩光中, 黄来明, 李山泉, 等. 水耕人为土磁性矿物的生成转化机制研究回顾与展望. *土壤学报*, 2017, 54 (2) : 309—318
Han G Z, Huang L M, Li S Q, et al. Review and prospect of researches on production and transformation of magnetic minerals in paddy soils during pedogenesis (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2) : 309—318
- [10] 黄来明, 邵明安, 陈留美, 等. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征. *土壤学报*, 2017, 54 (1) : 1—13
Huang L M, Shao M A, Chen L M, et al. Evolution characteristics of iron oxides and magnetic susceptibility in Stagnic Anthrosols along Chronosequences (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1) : 1—13
- [11] Schaetzl R J, Anderson S. *Soils: Genesis and geomorphology*. New York: Cambridge University Press, 2005
- [12] 龚子同. 水稻土的耕性及其在土壤分类上的意义. *土壤学报*, 1979, 16 (2) : 85—93
Gong Z T. The tillage of paddy soil and its significance on soil classification (In Chinese) . *Acta Pedologica Sinica*, 1979, 16 (2) : 85—93
- [13] Carré F, Jacobson M. Numerical classification of soil profile data using distance metrics. *Geoderma*, 2009, 148 (3/4) : 336—345
- [14] Harden J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: Examples from a soil chronosequence in central California. *Geoderma*, 1982, 28 (1) : 1—28
- [15] Harden J W, Taylor E M. A quantitative comparison of soil development in four climatic regimes. *Quaternary Research*, 1983, 20 (3) : 342—359
- [16] Vidic N J, Lobnik F. Rates of soils development of the chronosequence in the Ljubljana Basin, Slovenia. *Geoderma*, 1997, 76 (1/2) : 35—64
- [17] Tsai C C, Tsai H, Hseu Z Y, et al. Soil genesis along a chronosequence on marine terraces in eastern Taiwan. *Catena*, 2007, 71 (3) : 394—405
- [18] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in South China. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 (4) : 435—444
- [19] Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. *Chinese Soil Taxonomy*. Beijing: Science Press, 2003
- [20] Schoeneberger P J, Wysocki D A, Benham E C, et al. *Field book for describing and sampling soils*. 2nd ed. Lincoln: National Soil Survey Center, 2002
- [21] 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*. 南京: 南京出版社, 1989
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. *Chinese standard soil colour charts (In Chinese)*. Nanjing: Nanjing Press, 1989
- [22] Mehra O P, Jackson M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 1960, 7 (5) : 317—327
- [23] 南京农业大学. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 1986: 153—154
Nanjing Agricultural University. *Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese)*. Beijing: China

- Agriculture Press, 1986: 153—154
- [24] 韩光中, 张甘霖. 母质对南方丘陵区水耕人为土理化性质演变的影响. 土壤学报, 2014, 51 (4) : 98—106
- Han G Z, Zhang G L. Influence of parent material on evolution of physico-chemical properties of Hydragric Anthrosols in hilly regions of South China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (4) : 98—106
- [25] Colman S M. Rock weathering rates functions of time. *Quaternary Research*, 1981, 15 (3) : 250—264
- [26] Righi D. Huber K. Keller C. Clay formation and podzol development from postglacier moraines in Switzerland. *Clay Minerals*, 1999, 34 (2) : 319—332
- [27] Huang W S, Tsai H, Tsai C C, et al. Subtropical soil chronosequence on Holocenemarine terraces in eastern Taiwan. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (4) : 1271—1283

Numerical Comparison between Hydragric Anthrosols of Different Parent Materials in Development in Hill Regions of South China

HAN Guangzhong¹ XIE Xianjian¹ LI Shanquan^{2†}

(1 *Laboratory of Simulation on Soil Process, College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China*)

(2 *College of Resources and Environment, Xingtai University, Xingtai, Hebei 054001, China*)

Abstract 【 Objective 】 How to measure development degrees of Hydragric Anthrosols is still an unsolved problem in pedogenesis. Therefore, it is essential to define indices that can be used to quantitatively evaluate developments of Hydragric Anthrosols. 【 Method 】 In this study, chronosequences of three types of Hydragric Anthrosols derived from purple sandy shale (PS), Quaternary red clay (RC) and red sandstone (RS), separately, in the hilly regions of South China were studied in an attempt to characterize development degree of Hydragric Anthrosols with attribute distance and soil development indices and to exposit effect of parent materials on development rate of Hydragric Anthrosols. Five morphological characteristics, including rubification, melanization, texture, structure and moist consistence, were cited as horizon indices (HI), while common soil properties, like pH, clay contents, free iron (Fe_d), soil organic carbon (SOC) and magnetic susceptibility (MS), were for horizon distance (HD) calculations. 【 Result 】 Compared with their respective original soil profiles, the paddy soil profiles generally had complicated patterns with pedogenic horizons getting more obvious with depth due to pedogenesis. Similarly, clay, SOC, pH, iron oxides and magnetic properties varied observably with cultivation history. HI is an indicator for layer difference in soil morphology and HD one for layer difference in soil property between paddy and their original soils. They can be used to measure development of individual horizons within a profile from different angles. The variations of SOC, pH, clay and MS in soil development were significantly related to HD, indicating that they played important roles in determining HD and the soils, easier to have these properties changed were often higher in developing rate. It was also quite obvious that rubification was the most closely related to HI, explaining 83.1% of the variation of HI at all depths, and followed by melanization and moist consistence, which indicated that soil color and soil consistence played important roles in determining HI in this study. Moreover, an intrinsic relationship was observed of morphological features with general soil properties in pedogenesis of Hydragric Anthrosols. As RC-derived soils were thick in soil layer, red in color, and high in clay content, in soil moisture and nutrient retention capacity, and in cohesiveness and plasticity, they were liable to have SOC accumulated and develop rapidly. As PS-derived

soils were thick in soil layer, high in clay+silt (<0.10mm) content and in moisture and nutrient retention capacity, and fairly high in cohesiveness and plasticity, they were liable to have SOC accumulated too and develop quite rapidly or rank second in soil development rate. And as RS-derived soils were thin in soil layer and low in clay and silt content, in soil moisture and nutrient retention capacity and in cohesiveness and plasticity, it was hard for them to accumulate SOC or to develop fast. 【 Conclusion 】 The effects of parent material on development of Hydragric Anthrosols were reflected through their effects on development rate of the soil. All the findings show that Hydragric Anthrosols develops at a much higher average rate than natural soils do, particularly under paddy cultivation towards a set direction. But with the cultivation going on and on, development rate of the soil generally declines. The relationship between soil development rate and soil forming history or age can be fitted with a logarithmic equation. This quantification method may help improve knowledge about the soil forming process of Hydragric Anthrosols and realize quantitative comparison of Hydragric Anthrosols of different regions in development rate, and hence it may enjoy a bright future in application. However, as this method is still at its initial test stage, it needs further validation and improvement through researches.

Key words Hydragric Anthrosols; Chronosequence; Parent material; Pedological distance; Soil developmental index

(责任编辑：檀满枝)