

DOI: 10.11766/trxb201810120465

慈溪 1000 年时间序列农田土壤氮矿化和硝化的变化*

汪峰^{1, 2} 姚红燕^{1†} 陈若霞¹ 陈贵³ 戴瑶璐¹

(1 宁波市农业科学研究院, 浙江宁波 315040)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 嘉兴市农业科学研究院, 浙江嘉兴 314016)

摘要 长时间序列土壤关键氮(N)转化过程和相关微生物的变化规律仍不清楚。以慈溪市滨海围垦农田土壤为研究对象, 利用室内培养法研究了11个不同利用年限土壤(0~1 000 a) N矿化速率、硝化强度和硝化细菌数量。结果表明, 随着利用年限的增加, 土壤电导率和pH下降, 而有有机质和全氮逐渐积累, 土壤性质在利用前50 a内变化幅度较快; 土壤N矿化速率的大小表现为: 220~1 000 a > 0~50 a > 60~200 a; 硝化强度大体随着利用年限的延长而增强, 而土壤硝化细菌数量表现为在0~20 a增加后逐渐降低的趋势, 其中, 20~60 a达到最高; 皮尔森相关和聚类推进树(ABT)分析表明, 土壤利用年限(45%)、电导率(12%)和有机质(11%)是影响硝化强度的主控因子, 土壤中NH₄⁺-N和有效磷含量分别是影响N矿化速率(86%)和硝化细菌数量(42%)的关键限制因子。因此, 海陆界面土壤在持续农业利用过程中, 硝化强度及硝化细菌丰度得到一定加强, 但同时受到历史条件和当代环境因素的共同影响。

关键词 利用年限; 时间序列; 硝化强度; 矿化速率; 滨海围垦农田土壤

图书分类号 S154.2 **文献标识码** A

农田生态系统中土壤氮(N)循环影响土壤肥力和作物生长, 而土壤微生物是驱动氮循环过程的关键因子^[1]。氮循环过程中, 土壤氮矿化过程反映了土壤氮供应能力, 而硝化过程则是氮循环中的关键限速步骤。作为世界上最大的化学氮肥消耗国, 我国每年氮肥用量3 000万t(折纯), 占全球总量的33%^[2]。矿化和硝化过程不仅决定了土壤中氮素形态的分配, 还决定了硝酸盐淋失, 影响氮肥利用率和水体环境安全。

自然状态下的海洋和陆地过渡带为滩涂湿地,

为了满足不断增长的粮食需求, 人类将大量自然滩涂湿地围垦成为农业用地。据估算, 我国自1950年后约有51% (2.2 × 10⁴ km²)的滨海自然湿地被围垦利用^[3]。尽管滨海围垦农田土壤受历史因素的影响, 均表现出高盐、高碱和低肥的特点^[4], 但围垦利用过程中土壤盐度、养分含量等条件的变化导致不同利用年限土壤氮转化功能呈现不同特点^[5-6]。研究表明, 巴西泻湖沉积物硝化强度与盐分浓度呈显著负相关, 在0~3‰范围内, 硝化强度随盐度呈指数衰减^[7]。针对我国主要滨海河口

* 国家自然科学基金项目(41501279)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y20160013)、宁波市农业科学研究院育苗人才项目(2016YYM003)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41501279), the Project from State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (No. Y20160013) and the Talents Program of the Ningbo Academy of Agricultural Sciences (No. 2016YYM003)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yaohongyan2000@163.com

作者简介: 汪峰(1982—), 男, 安徽潜山人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业资源利用研究。E-mail: fwang82@163.com

收稿日期: 2018-10-12; 收到修改稿日期: 2018-11-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-12-03

沉积物的研究也发现, 硝化速率分布有明显的自近岸向外海逐渐降低的趋势, 高盐度条件下的硝化作用受到抑制^[8-10]。然而, 以上研究对象均为沉积物, 而针对海陆界面农田土壤矿化及硝化作用规律及主要控制因子的研究鲜见报道, 尤其是在围垦后随着农业利用年限增加, 土壤性质的变化在多大程度上影响关键氮转化功能尚不清楚。

浙江省慈溪市位于杭州湾南岸, 其经济社会发展在很大程度上是杭州湾南岸海涂湿地围垦的历史。杭州湾南岸海岸变迁与滩涂围垦的研究表明^[11], 慈溪滩涂属于淤涨型滩涂, 自宋代以来已修建11道海塘, 且每个海塘修建均有明确的时间记载, 新中国成立前海岸线平均每年向外推移25 m, 之后达到50~100 m, 改革开放以来已围垦土地1.33万hm², 该地区目前已成为不同利用年限土壤性质和微生物分布规律研究的典型区^[12-13]。本研究以杭州湾南岸垂直海岸带方向不同利用年限的围垦农田土壤为研究对象, 基于室内培养法分析土壤N矿化速率、硝化强度及硝化微生物数量, 利用多元统计方法揭示海陆界面农田土壤主要氮转化过程和硝化微生物的分布规律及主控因素, 为滨海围垦农田氮素管理和滨海区域环境保护提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于浙江省慈溪市(30°15'N,

121°10'E), 地处浙江省杭州湾南岸, 其海岸线北凸成弧形, 是杭州湾滩涂淤涨最快的区段。该区域人口稠密, 土地资源稀缺, 在不同历史时期, 大量淤积海涂被围垦改造为农业用地。杭州湾围垦历史可追溯至公元5世纪^[11], 民间随海涂的地形开始垒土筑塘, 随着海涂的泥沙淤积北移, 不断增筑海塘, 至今已筑至十一塘。新围垦土壤中含盐量较高, 土壤类型归为近代海相或河海相沉积物发育而成的滨海盐土^[14], 经过长时间的脱盐和熟化过程(滨海盐土—强盐渍化土—中度盐渍化土—轻度盐渍化土—脱盐潮土)最终演变为脱盐潮土, 农田地力也得到了较大的提升。

该地区属亚热带季风性湿润气候, 因濒临东海又带有海洋性季风气候特征。气候温暖多雨, 年均温16.0℃, 无霜期244 d, 最热月均温28.2℃, 最冷月均温3.8℃, 年平均日照时数2 038 h。年均降水量为1 273 mm, 年蒸发量894 mm, 同时降水量季节波动性大, 雨季特征明显, 约60%的降水量分布于5—9月, 每年夏秋间多热带风暴或台风。

1.2 样品采集

2015年12月, 沿垂直于海岸线方向选择11个采样面(图1), 包括10个不同利用年限(5~1 000 a)海塘内农田土壤采样面(WT1~WT10)和1个海塘外滩涂盐沼采样面(WT0)。研究区域农田主要是毛豆(春夏)-西兰花(秋冬)轮作模式, 考虑到地上作物类型会影响土壤氮转化过程, 采样尽量选择同一轮作模式农田土壤(WT10区域内无该

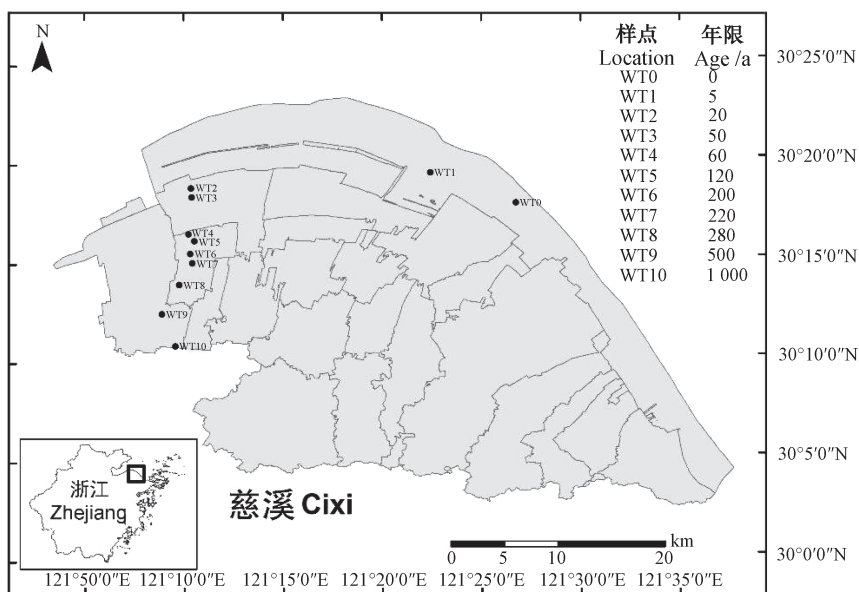


图1 土壤样品采集位置

Fig. 1 Location of the soil sampling sites

轮作模式, 因此选择水稻田)。每个采样面在平行于海岸线方向上选择6个采样点作为重复, 相邻两个采样点间隔不少于50 m。在西兰花结球期用不锈钢土钻(2 cm)按5点采样法采集20 cm表层土壤, 混匀后用四分法留取1 kg左右, 装入密封塑料袋中带回实验室。除去石块和根系, 一部分土样风干研磨后进行理化性质分析, 另一部分置于4℃冰箱, 测定硝态氮、铵态氮等指标, 鲜土项目的测定在2周内完成。

1.3 测定项目与方法

土壤理化性质测定: 土壤pH采用玻璃电极测定, 水土比2.5:1; 电导率采用电导法, 水土比5:1; 有机质采用重铬酸钾容量法测定; 全氮采用半微量凯氏法测定; 土壤碱解氮采用扩散法测定; 有效磷采用Olsen-P法提取, 钼锑抗比色法测定; 速效钾采用醋酸铵浸提, 火焰光度法测定; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提, 流动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定。以上方法参考文献[15]。

土壤N矿化速率: 采用直接测定土壤矿质氮含量的方法^[16], 称取相当于10 g干重的新鲜土壤加入100 mL塑料瓶中, 向瓶中加入用酸处理过的石英砂10 g, 震荡使土壤和石英砂混合均匀, 加纯水至土壤田间持水量的65%, 塑料瓶口套上封口膜, 并在其上方留有数个小孔来保障空气流通, 每2~3天补充损失水分。在0 d和14 d收集培养的土壤, 测定其中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。土壤N矿化速率=(培养后的无机氮量-培养前的无机氮量)/培养天数。

土壤硝化细菌数量采用最大或然值法(Most possible number, MPN), 土壤硝化强度采用悬液培养法测定^[17]。

1.4 数据处理

聚类推进树(Aggregated boosted tree, ABT)分析能够预测环境变量对某个响应指标的相对贡献大小^[18-19], 本研究利用ABT分析土地利用年限和土壤理化性质等因子对土壤硝化强度、N矿化速率和硝化细菌数量的相对重要性。ABT分析利用“gbmplus”软件包在R-2.7.1(<http://www.R-project.org>)中完成。

皮尔森相关分析和单因素方差分析(One-way ANOVA)在SPSS 20.0软件中完成, 差异显著性采

用邓肯(Duncan)新复极差法进行检验; 回归拟合及其制图在SigmaPlot 12.0中完成, 文中数据计算和其余图表制作在Excel 2012中完成。

2 结 果

2.1 不同利用年限土壤理化性质

研究区域不同利用年限土壤理化性质见表1。海塘外滩涂盐沼(WT0)土壤pH呈碱性, 电导率高达 $4\ 654\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 土壤含盐量高, 利用5 a(WT1), 电导率下降81.7% ($P<0.05$), 而土壤pH无显著性差异; 利用20 a(WT2), 电导率和pH与WT0相比均有显著性变化 ($P<0.05$), 其中土壤电导率下降94.1%, 达轻度盐渍化水平, 土壤pH下降0.27个单位, 呈弱碱性。土壤电导率和pH在利用50~1 000 a之间总体上呈波动下降趋势, 在利用1 000 a(WT10)下降至最低, 分别达到 $131\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和7.16, 土壤盐碱性障碍基本消除。

研究区域土壤有机质和全氮含量总体偏低(表1)。WT0土壤有机质和全氮含量分别为 $10.2\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.45\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 随着利用年限增加, 土壤有机质和全氮含量逐渐上升, 在利用1 000 a后分别达到 $37.3\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.60\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较WT0分别提高了2.65倍和2.52倍。土壤速效养分中, 除速效钾含量较丰富外, 碱解氮和有效磷均缺乏; 其中, 土壤速效钾随着利用年限的增加而逐渐降低, 而WT2、WT3、WT4处理土壤有效磷显著高于其他处理; 土壤碱解氮平均含量仅为 $45.8\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (除WT10外); $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占总矿质氮的90.4%, 其中, WT4、WT5、WT6处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著高于其他处理。

2.2 不同利用年限土壤硝化强度

通过培养法计算土壤的硝化强度如图2所示。不同利用年限土壤硝化强度介于14.3%~60.5%之间, 随着利用年限的延长, 土壤硝化强度趋于升高。土壤硝化强度大致可划分为3个梯度: 1) 高硝化强度, 200~1 000 a(WT6、WT7、WT8、WT9、WT10), 平均为56.8%; 2) 中等硝化强度, 20~120 a(WT2、WT3、WT4、WT5), 平均为37.5%; 3) 低硝化强度, 0~5 a(WT0、WT1), 平均仅为17.4%。方差分析表明, 3个不同梯度层次样品间土壤硝化强度均存在显著性差异 ($P<0.05$)。

表1 不同样点土壤部分理化性质

处理 Treatment		Table 1 Soil physicochemical properties relative to location of the sampling site							
pH		电导率 EC $/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	有机质 SOM $/(g\cdot\text{kg}^{-1})$	全氮 Total N $/(g\cdot\text{kg}^{-1})$	有效磷 Available P $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$	速效钾 Available K $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$	碱解氮 Alkaline N $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$	NO_3^-N $/(mg\cdot\text{kg}^{-1})$
WT0	8.55a	4 654a	10.2f	0.45e	5.3cd	328a	46.3cd	20.4b	0.24d
WT1	8.51ab	852b	13.0def	0.62d	13.3b	273b	30.0e	14.4c	3.10b
WT2	8.28bcd	277cde	15.1bcde	0.43e	21.2a	164cd	41.4cde	2.5d	1.19cd
WT3	8.03d	559c	12.6ef	0.68cd	23.6a	372a	35.7de	15.5bc	5.48a
WT4	8.15cd	518cd	14.1cdef	0.67cd	24.5a	210c	40.6cde	37.9a	1.35c
WT5	8.44ab	387cde	12.5ef	0.85bc	8.4bcd	135d	44.5cd	38.4a	1.22cd
WT6	8.29bc	229de	17.7bc	0.86b	9.7bc	109d	52.9c	38.9a	1.36c
WT7	8.16cd	300cde	16.8bcde	0.95b	8.4bcd	120d	49.4c	1.4d	0.93cd
WT8	8.12cd	240de	17.3bcd	0.85bc	8.4bcd	113d	64.7b	0.4d	0.92cd
WT9	8.09cd	207de	19.0b	1.00b	9.8bc	108d	52.6c	0.4d	0.84cd
WT10	7.16e	131e	37.3a	1.60a	3.3d	108d	104.4a	2.1d	1.60c

注：数值用平均值表示 ($n = 6$)，同一列中相同字母表示差异未达到显著水平 ($P > 0.05$)。下同 Note: Values (Means, $n = 6$) within the same column followed by the same letter are not significantly different ($P > 0.05$). The same below

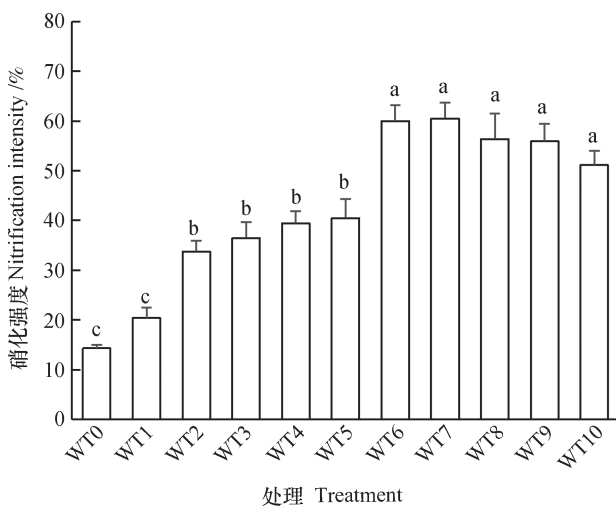
2.3 不同利用年限土壤氮矿化速率

不同利用年限土壤氮矿化速率如图3所示。220 ~ 1 000 a样品 (WT7、WT8、WT9、WT10) 土壤矿化速率最高，平均达 $3.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，显著高于其他年限样品 ($P < 0.05$)；0 ~ 50 a样品

(WT0、WT1、WT2、WT3) 矿化速率中等，平均为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ；60 ~ 200 a样品 (WT4、WT5、WT6) 矿化速率最低，平均仅为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，显著低于其他样品 ($P < 0.05$)。

2.4 不同利用年限土壤硝化细菌数量

不同利用年限硝化细菌数量如图4所示。土地利用初期 (0 ~ 5 a)，土壤中硝化细菌数量处于较低水平，每克土壤平均仅有 0.2×10^3 个，随着利用



注：图上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Note: Different lowercase letters mean significant differences ($P < 0.05$) between treatments. The same below

图2 不同处理下土壤硝化强度

Fig. 2 Nitrification intensity of soils relative to treatment

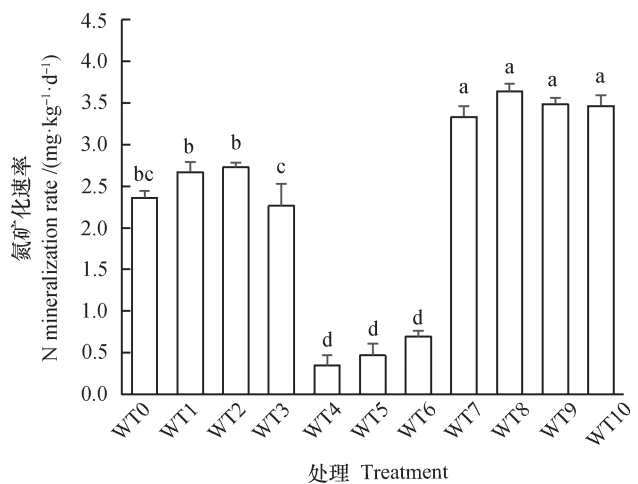


图3 不同处理下土壤氮矿化速率

Fig. 3 N mineralization rate of soils relative to treatment

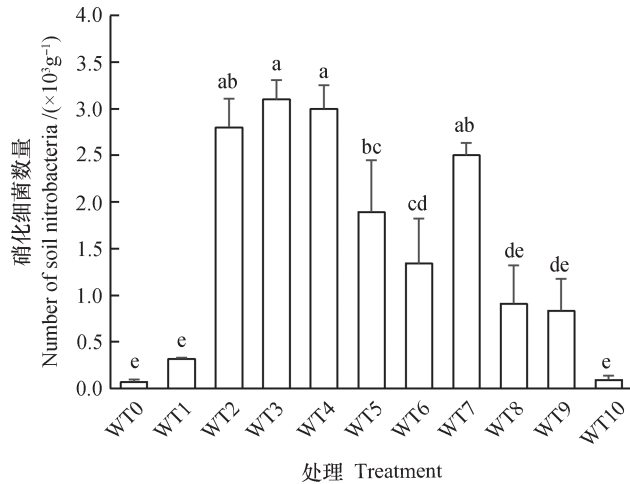


图4 不同处理下土壤硝化细菌数

Fig. 4 Number of soil nitrobacteria relative to treatment

时间增加, 硝化细菌数快速增加, WT2相比WT1增加了7.7倍。土壤硝化细菌数量在WT3和WT4处理达到最高, 每克土壤平均 3.0×10^3 个。在60~1 000 a, 随着利用时间的延长, 土壤硝化细菌数量逐渐降低(除WT7), 最终在WT10处理中仅为 $0.1 \times 10^3 \text{ g}^{-1}$ 。

2.5 不同利用年限土壤硝化强度、氮矿化速率和硝化细菌数量的影响因子

将土壤硝化强度、氮矿化速率和硝化细菌数量与土壤相关性进行相关分析(表2), 结果表明, 土壤硝化强度与利用年限、有机质、全氮和碱解氮呈显著正相关($P < 0.01$), 而与土壤含水率、pH、电导率和速效钾呈显著负相关($P < 0.01$)。氮矿化速率与利用年限、有机质、全氮、碱解氮呈显著正相关($P < 0.01$),

而与土壤pH、 NH_4^+ -N和有效磷呈显著负相关($P < 0.05$)。硝化细菌数与土壤有效磷呈显著正相关($P < 0.01$), 而与利用年限、土壤含水率、电导率、有机质、全氮、碱解氮呈显著负相关($P < 0.05$)。

将表2中筛选到的具有显著性相关的因子分别加入ABT模型进行分析(图5), 结果表明, 土壤利用年限对硝化强度的影响最大(45%), 其次是电导率(12%)和有机质(11%), 其余因子贡献率均不足10%; NH_4^+ -N含量是影响N矿化速率的主要因素(86%); 影响硝化细菌丰度变化的相对贡献率由大到小依次为: 有效磷、利用年限、碱解氮、全氮、含水量、电导率、有机质, 其中有效磷贡献率达42%。

2.6 土壤硝化强度、氮矿化速率和硝化细菌数量与影响因子的回归模拟

为了表征土壤硝化强度、氮矿化速率和硝化细菌数量随利用年限的变化规律, 通过回归模拟的方法构建线性回归方程(图6)。硝化强度随利用时间的变化方程为 $y = 56.4x / (x + 15.9)$, 氮矿化速率随利用时间的变化方程为 $y = 2.717 + 0.001 1x$, 硝化细菌数量随利用时间的变化方程为 $\text{Ln}(y) = 7.061 + 0.002 3x$ 。此外, 根据表2中的相关分析, 选取对硝化强度、氮矿化速率和硝化细菌数量贡献率最大的土壤理化因子做回归分析(图6), 硝化强度随电导率变化的方程为 $y = 74.1 - 68.0x / (x + 448.7)$, 氮矿化速率随 NH_4^+ -N变化的方程为 $y = 3.471 - 0.073x$, 硝化细菌数量随有效磷变化方程为 $\text{Ln}(y) = 8.8x / (x + 3.1)$ 。

表2 土壤硝化强度、氮矿化速率、硝化细菌数量与土壤性质的相关系数

	UA	SWC	pH	EC	SOM	TN	AN	NH_4^+ -N	AP	AK
NI	0.489**	-0.455**	-0.399**	-0.619**	0.446**	0.522**	0.408**	-0.166	-0.180	-0.636**
NMR	0.436**	0.134	-0.341**	-0.027	0.376**	0.281*	0.347**	-0.946**	-0.297*	-0.099
NN	-0.378**	-0.411**	0.085	-0.326**	-0.255*	-0.266*	-0.353**	0.172	0.616**	0.078

注: NI, 硝化强度; NMR, N矿化速率; NN, 硝化细菌数量; UA, 利用年限; SWC, 含水率; TN, 全氮; AN, 碱解氮; AP, 有效磷; AK, 速效钾。下同 Note: NI, Nitrification intensity; NMR, N mineralization rate; NN, Number of nitrobacteria; UA, Use age, SWC, Soil water content, TN, Total N; AN, Alkaline N; AP, Available P; AK, Readily available K. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $n = 66$. The same below

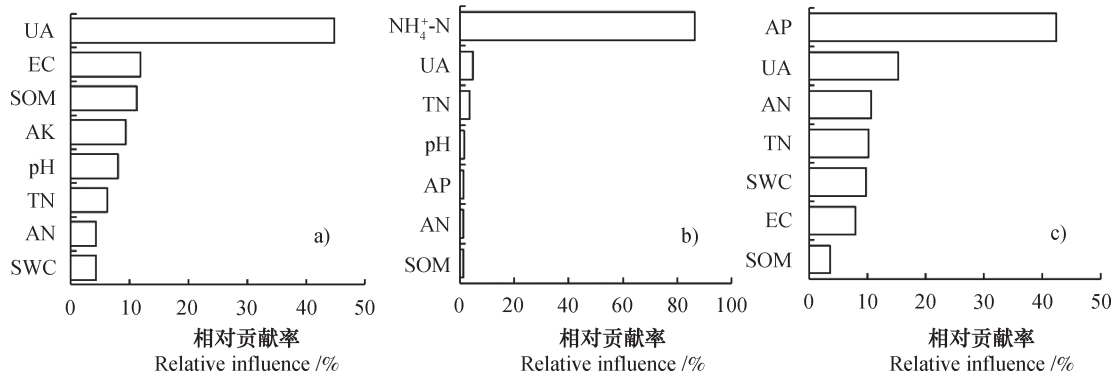


图5 基于ABT模型预测土壤性质对硝化强度 a)、氮矿化速率 b)和硝化细菌数量 c)的相对重要性

Fig. 5 Relative importance of soil properties to nitrification intensity a), N mineralization rate b) and number of nitrobacteria c) as predicted with the aggregated boosted tree (ABT) model

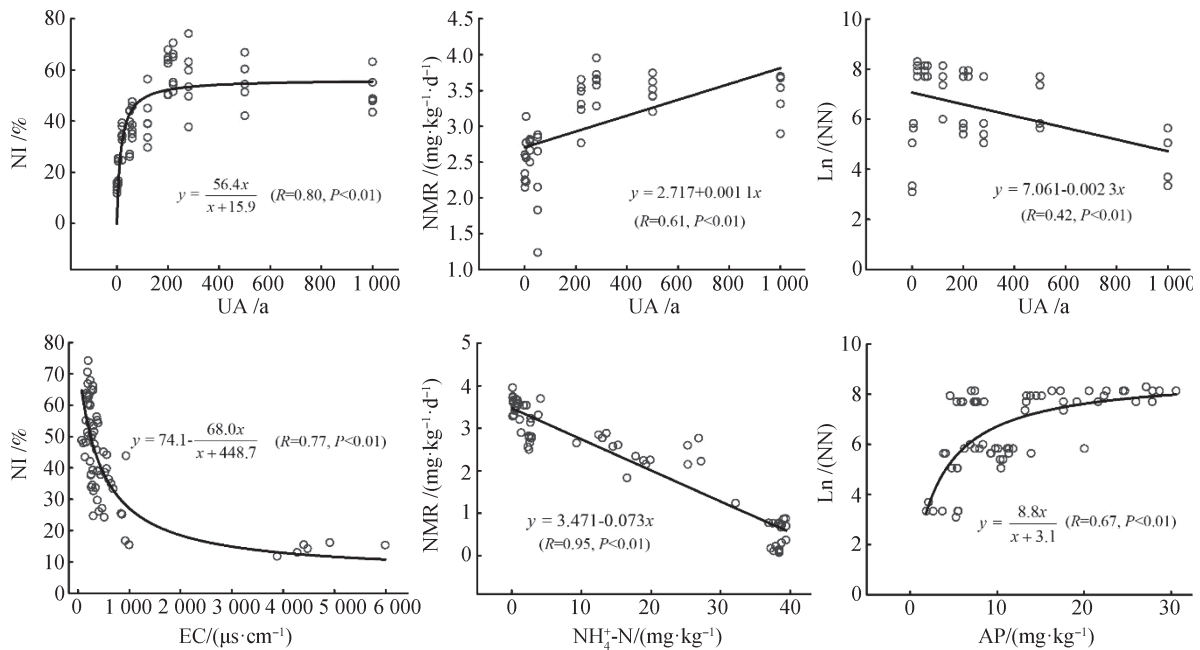


图6 基于回归分析土壤硝化强度、氮矿化速率、硝化细菌数量与部分土壤性质的关系

Fig. 6 Relationships of some soil property indices with nitrification intensity, N mineralization rate and number of nitrobacteria based on regression analysis ($n=66$)

3 讨论

本研究以位于浙江慈溪市不同利用年限滨海围垦农田土壤为研究对象,探索土壤氮转化关键过程(矿化和硝化)及硝化微生物分布规律。近10年来,年代序列土壤发生演变已成为世界土壤学研究热点^[20],研究地点主要选择在杭州湾南岸围垦滩涂地,还有部分选择珠江三角洲、崇明岛等滨海区域^[12]。这些研究对不同利用年限土壤形态^[21]、有机碳^[22]、pH^[23]、铁氧化物^[24]、磷吸附转运^[25]等进行了全面的调查分析,证实了农业活动

有利于土壤中碳、氮、磷等养分元素积累,但目前尚不清楚不同土壤养分达到“稳定状态”所需的时间。利用年代序列法(Chronosequence approach)研究发现,水田耕作条件下,表层土壤有机碳和大量元素(Ca、Mg、Na、P)在50 a内可发生显著变化,而土壤形态和铁氧化物至少需要1 000 a^[12]。本研究同样发现,土壤电导率和pH在农业利用50 a内快速下降,随后呈现波动下降趋势(表1);而土壤有机质和全氮虽然总体随利用时间延长处于上升趋势,但利用前50 a内增加幅度显著高于后期。不同土地利用方式(如水田和旱地)对土壤性质演

变有显著影响, Kölbl等^[21]研究表明, 水田管理相对于旱地加速了土壤成土过程。本研究虽然以旱地土壤为对象, 但也存在着一定的水田耕作历史, 慈溪滨海盐碱土在农业利用初期一般通过种植水稻对土壤洗盐、排盐, 至少3~5 a后才可改为旱地利用, 导致利用初期土壤性质快速变化。

本研究表明, 利用5~1 000 a的农田土壤平均硝化强度为45.4%, 虽然高于南方酸性红壤, 但低于东北黑土和华北平原的潮土^[26]。滨海围垦农田土壤母质为海洋和河口沉积物, 土壤微生物受盐碱胁迫, 导致杭州湾滨海盐土区总体硝化强度受抑制, 针对闽江口沉积物的研究也表明硝化强度总体偏低^[27]。除了成土历史因素外, 本研究证实土壤盐度(电导率)是影响滨海围垦农田土壤硝化强度的主要影响因子(图5)。盐度主导沉积物硝化等氮转化过程已有诸多报道^[28-29]。研究者针对巴西泻湖沉积物研究发现, 在0~3‰范围内硝化强度随盐度呈指数衰减^[7], 在珠江、长江和黄河三角洲的研究也发现, 较高的盐度对硝化过程有明显的抑制作用, 而低盐条件下的含盐量变化对土壤硝化强度影响不明显^[8-10]。本研究也证实, 滨海围垦农田土壤随着利用年限的延长, 土壤盐度下降, 土壤硝化强度趋于升高(图2), 与以上研究结果一致。胡君利等^[13]基于慈溪围垦农田研究发现, 随着利用年限的延长, 水稻土的硝化强度趋于下降; Jiang等^[30]同样发现300 a水稻土硝化作用和氮矿化速率均高于利用700 a土壤。以上两项研究与本文结果不一致的原因可能是其对象为水稻土, 水田在大部分时间处于淹水状态, 而硝化微生物需要通过氧化氨分子获得能量维持其生存与生长, 因此, 硝化强度受氧供应及土壤pH强烈影响^[31]。研究表明, 生态系统类型是土壤硝化过程地理分异规律的最优解释因子, 农田生态系统硝化速率显著高于湿地, 也一定程度证明淹水缺氧条件对土壤硝化过程的抑制作用^[32]。

关于土壤微生物分布是历史因素还是当代环境条件决定的, 目前学术界尚存在争议。本研究利用空间换时间的方法研究了硝化细菌数量和硝化强度在大时间尺度下的变化规律, 排除了大尺度下研究中受不同土壤类型的干扰, 具有较强的代表性。本研究中历史因素(利用年限)对硝化强度和硝化细菌数量的贡献率分别为45%和15%, 其余均为当代

环境条件(有效磷、电导率等土壤理化性质)所贡献。因此, 本研究表明了主导杭州湾滩涂围垦农田土壤硝化细菌数量和硝化强度的是当代环境条件, 与Sun等^[33]基于长期土壤移置试验的结论一致。滨海盐碱土壤除了受盐度胁迫外, 土壤养分含量极低, 致使微生物及其功能还易受养分供给胁迫, 因此, 当代环境因子对其有更大的影响。例如, 本研究表明, 有效磷是硝化细菌丰度的主要影响因素(图5)。磷元素不仅是微生物重要组成元素, 同时也参与微生物代谢, 相关研究也表明, 土壤中有有效磷的供给是微生物物种分化主要控制因素^[34], 同时也是微生物生长繁殖的主要限制因子^[35]。

土壤是一个复杂的动态系统, 探寻土壤微生物多样性与功能的关系非常困难^[36]。本研究中, 虽然在利用前期(0~5 a)土壤硝化强度与硝化细菌数量均处于较低水平, 但随着利用年限的增加, 两者变化趋势出现较大的差异(图2、图4), 相关分析同样表明硝化细菌数量与硝化强度无显著相关性($r=0.093$, $P=0.456$)。导致以上结果的主要原因可能是: 1) 随着利用年限增加, 有机碳等养分供应充足, 硝化微生物活性增强, 因此, 20~120 a土壤硝化微生物很可能出现功能冗余; 2) 一定的盐度范围有利于硝化微生物增殖^[28], 但硝化活性受抑制; 3) 土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响矿化速率的主要因子(图5), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 作为底物影响了硝化微生物数量; 4) 未考虑到硝化微生物群落分布及微生物间的相互作用^[37]。利用高分辨率的测序和分子生态网络构建技术, 分析不同利用年限农田土壤硝化微生物群落分布及网络关系, 阐明土壤硝化功能的关键生物因子, 是土壤生物地理学需要重点关注的研究内容。

4 结 论

本研究选取杭州湾南岸的不同利用年限滨海围垦农田土壤为研究对象, 通过比较不同利用年限的海陆界面农田关键土壤过程, 以空间换时间, 探索在大时间尺度下(0~1 000 a)海陆界面旱地土壤关键氮素转化过程和硝化细菌生物演变规律。研究结果表明, 随着土壤利用年限的增加, 土壤盐度和pH下降, 土壤C、N等含量逐渐积累, 且利用前50 a内变化幅度较大; 土壤硝化强度随着利用时间

的延长而趋于升高,其主要影响因子是利用年限(45%);土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响N矿化速率的主要因子(86%),利用220~1 000 a土壤有较高的矿化速率;土壤硝化细菌数量表现为先增加后降低的趋势,土壤有效磷是其关键限制因子(42%)。海陆界面土壤在农业持续利用过程中,随着土壤盐碱下降至一定的范围内,硝化强度得到一定提高,今后要利用综合调控手段以避免农田N素淋失对沿海渔业和生态环境带来的负面影响。

参考文献

- [1] 孙波, 王晓玥, 吕新华. 我国60年来土壤养分循环微生物机制的研究历程——基于文献计量学和大数据可视化分析. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1590—1601
Sun B, Wang X Y, Lü X H. The historical venation in research on microbial mechanisms of soil nutrient cycling in the past 60 years—Based on bibliometric analysis and big data visualization (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 (6): 1590—1601
- [2] 颜晓元, 夏龙龙, 遆超普. 面向作物产量和环境双赢的氮肥施用策略. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 177—183
Yan X Y, Xia L L, Ti C P. Win-win nitrogen management practices for improving crop yield and environmental sustainability (In Chinese). Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33 (2): 177—183
- [3] Wang Y, Wang Z L, Feng X, et al. Long-term effect of agricultural reclamation on soil chemical properties of a coastal saline marsh in Bohai Rim, Northern China. PLoS One, 2014, 9 (4): e93727
- [4] Bai J, Gao H, Xiao R, et al. A review of soil nitrogen mineralization as affected by water and salt in coastal wetlands: Issues and methods. CLEAN—Soil Air Water, 2012, 40 (10): 1099—1105
- [5] Gao H, Bai J, He X, et al. High temperature and salinity enhance soil nitrogen mineralization in a tidal freshwater marsh. PLoS One, 2014, 9 (4): e95011
- [6] Song Y, Zhang X, Ma B, et al. Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil. Biology and Fertility of Soils, 2013, 50 (2): 321—332
- [7] Santoro A, Enrich-Prast A. Salinity control of nitrification in saline shallow coastal lagoons. Acta Limnologica Brasiliensia, 2009, 21 (2): 263—267
- [8] 吕艳华. 黄河三角洲湿地硝化细菌生态特征及硝化作用研究. 山东青岛: 中国海洋大学, 2007
Lü Y H. Study on zoology characteristic of nitrifying bacteria and nitrification in Yellow River Delta (In Chinese). Tsingdao, Shandong: Ocean University of China, 2007
- [9] 李佳霖, 白洁, 高会旺, 等. 长江口邻近海域夏季沉积物硝化细菌与硝化作用. 环境科学, 2009, 30 (11): 3203—3208
Li J L, Bai J, Gao H W, et al. Nitrifying bacteria and nitrification in sediment at the adjacent sea area of Yangtze River estuary in summer (In Chinese). Environmental Science, 2009, 30 (11): 3203—3208
- [10] 王玉萍, 王立立, 李取生, 等. 珠江河口湿地沉积物硝化作用强度及影响因素研究. 生态科学, 2012, 31 (3): 330—334
Wang Y P, Wang L L, Li Q S, et al. Study on nitrification and impact factors in Pearl River estuarine wetlands (In Chinese). Ecological Science, 2012, 31 (3): 330—334
- [11] 冯利华, 鲍毅新. 慈溪市海岸变迁与滩涂围垦. 地理与地理信息科学, 2006, 22 (6): 75—78
Feng L H, Bao Y X. Coastal evolution process and tidal flat reclamation in Cixi City (In Chinese). Geography and Geo-Information Science, 2006, 22 (6): 75—78
- [12] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review. Geoderma, 2015, 237/238: 199—210
- [13] 胡君利, 林先贵, 尹睿, 等. 浙江慈溪不同利用年限水稻土主要微生物过程强度的比较. 环境科学学报, 2008, 28 (1): 174—179
Hu J L, Lin X G, Yin R, et al. Comparison of microbial processes in paddy soils of different ages in Cixi, Zhejiang (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28 (1): 174—179
- [14] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Chinese soil taxonomy (In Chinese). Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2001
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社 2000

- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] 王帘里, 孙波. 温度和土壤类型对氮素矿化的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (3): 583—591
Wang L L, Sun B. Effects of temperature and soil type on nitrogen mineralization (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2011, 17 (3): 583—591
- [17] 许光辉. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 中国农业出版社, 1986
Xu G H. Manual of soil microbiological analysis methods (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1986
- [18] De' ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction. Ecology, 2007, 88 (1): 243—251
- [19] 汪峰, 类成霞, 蒋珺霖, 等. 长江中下游两种典型水稻土壤微生物对砷污染的响应. 中国环境科学, 2014, 34 (11): 2931—2941
Wang F, Lei C X, Jiang Y J, et al. Response of microbial community to arsenic contamination in two major type of paddy soils in the middle and lower reaches of the Yangtse River (In Chinese). China Environmental Science, 2014, 34 (11): 2931—2941
- [20] Leguédou S, Séré G, Auclerc A, et al. Modelling pedogenesis of Technosols. Geoderma, 2016, 262: 199—212
- [21] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China). Geoderma, 2014, 228: 67—89
- [22] Wissing L, Kölbl A, Schad P, et al. Organic carbon accumulation on soil mineral surfaces in paddy soils derived from tidal wetlands. Geoderma, 2014, 228: 90—103
- [23] 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
- [24] Huang L M, Jia X X, Shao M A, et al. Phases and rates of iron and magnetism changes during paddy soil development on calcareous marine sediment and acid Quaternary red-clay. Scientific Reports, 2018, 8 (1): Article number 444
- [25] Huang L M, Jia X X, Zhang G L, et al. Soil organic phosphorus transformation during ecosystem development: A review. Plant and Soil, 2017, 417 (1/2): 17—42
- [26] 王帘里, 孙波. 培养温度和土壤类型对土壤硝化特性的影响. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1173—1179
Wang L L, Sun B. Effects of incubation temperature and soil type on soil nitrification (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (6): 1173—1179
- [27] 孙启元, 李家兵, 赖月婷, 等. 不同盐度对闽江河口沉积物硝化作用的影响. 应用生态学报, 2018, 29 (4): 1313—1320
Sun Q Y, Li J B, Lai Y T, et al. Effects of different salinity levels on nitrification processes in sediments of Minjiang River Estuary, China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29 (4): 1313—1320
- [28] Wang H T, Gilbert J A, Zhu Y G, et al. Salinity is a key factor driving the nitrogen cycling in the mangrove sediment. Science of the Total Environment, 2018, 631—632: 1342—1349
- [29] Li X, Yuan Y, Yuan Y, et al. Effects of salinity on the denitrification efficiency and community structure of a combined partial nitrification-anaerobic ammonium oxidation process. Bioresource Technology, 2018, 249: 550—556
- [30] Jiang X J, Liu W, Liu Q, et al. Soil N mineralization, nitrification and dynamic changes in abundance of ammonia-oxidizing bacteria and archaea along a 2000 year chronosequence of rice cultivation. Plant and Soil, 2013, 365 (1/2): 59—68
- [31] Rathnayake R M, Oshiki M, Ishii S, et al. Effects of dissolved oxygen and pH on nitrous oxide production rates in autotrophic partial nitrification granules. Bioresource Technology, 2015, 197: 15—22
- [32] 郭志英, 贾仲君. 中国典型生态系统土壤硝化强度的整合分析. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1317—1324
Guo Z Y, Jia Z J. Meta-analysis of soil nitrification activity in ecosystems typical of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (6): 1317—1324
- [33] Sun B, Wang F, Jiang Y, et al. A long-term field experiment of the role of contemporary geographic separation in shaping soil microbial community structure. Ecology and Evolution, 2014, 4 (7): 1073—1087
- [34] Souza V, Eguiarte L E, Siefert J, et al. Microbial endemism: Does phosphorus limitation enhance speciation? Nature Reviews Microbiology, 2008, 6 (7): 559—564
- [35] Liu L, Gundersen P, Zhang W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil microbial biomass and community structure in two reforested

- tropical forests. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14378
- [36] Nannipieri P, Ascher J, Ceccherini M, et al. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68 (1) : 12—26
- [37] Layeghifard M, Hwang D M, Guttman D S. Disentangling interactions in the microbiome: A network perspective. *Trends in Microbiology*, 2017, 25 (3) : 217—228

Variation of Nitrogen Mineralization and Nitrification in Agricultural Soils in Cixi along a 1000-Year Chronosequence

WANG Feng^{1,2} YAO Hongyan^{1†} CHEN Ruoxia¹ CHEN Gui³ DAI Yaolu¹

(1 Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo, Zhejiang 315040, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing, Zhejiang 314016, China)

Abstract 【Objective】 It is still unclear how key soil nitrogen (N) transformed and how the microbes involved in the transformation evolved along a long-term chronosequences of the soil in the coastal polders in Cixi. 【Method】 An indoor incubation experiment was carried out using soil samples collected from coastal polders in Cixi with cultivation age varying in the range of 0 ~ 1 000 years to determine N mineralization rate (NMR), nitrification intensity (NI) and number of nitrobacteria (NN). 【Result】 Results show that soil conductivity (EC) and pH decreased with aging of the soil, while soil organic matter (SOM) and total N (TN) accumulated in the topsoil, and soil properties changed significantly, especially during the first 50 years of cultivation. NMR varied in the sequence of 220 ~ 1 000 a > 0 ~ 50 a > 60 ~ 200 a; NI displayed a general rising trend with the cultivation going on year after year, but NN increased in the first 20 years, and peaked during the years of 20 ~ 60 and then turned downwards gradually. Person correlation and aggregated boosted tree (ABT) analyses show that cultivation history of the soil, EC, and SOM concentration were the dominant affecting factors, explaining 45%, 12% and 11% of the variation of NI, respectively, while soil NH₄⁺-N and available P contents were the ones, explaining 86% and 42% of the variation of NMR and NN, respectively. 【Conclusion】 Therefore, it could be concluded that during the course of sustainable agricultural utilization of the coastal polders nitrification intensity and nitrobacteria abundance increases to a certain extent, but they are subject to the joint impact of historical conditions and contemporary environmental factors.

Key words Utilization years; Chronosequences; Nitrification intensity; Mineralization rate; Coastal polder farmland soil

(责任编辑: 陈荣府)