DOI：10.11766/trxb201705130216

近30年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素*

代子俊[1] 赵 霞[1†] 李德成[2] 刘 峰[2] 石平超[1, 3] 庞龙辉[1]

（1 青海师范大学，青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海土壤数字服务中心，西宁 810008）

（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 贵州省松桃苗族自治县农牧科技局，贵州松桃 554100）

摘 要 基于湟水流域1985 年第二次土壤普查的45个剖面数据和2015 年土壤调查的61个剖面数据，采用统计和地统计学法，分析了流域0 ~ 15 cm和15 ~ 30 cm土层近30 年全氮（TN）的时空变异及影响因素。结果表明：从1985年至2015年，0 ~ 15 cm和15 ~ 30 cm层TN均值分别由1.33 g kg^{-1}和 1.15 g kg^{-1}升高至2.25 g kg^{-1}和2.08 g kg^{-1}，增幅为69.20%和80.87%；近30年来，湟水流域0 ~ 15 cm和15 ~ 30 cm土层全氮呈现增加趋势，其中西部、北部、中部以增加为主，东南部以递减为主；空间相关性由强变为中等，1985 年TN含量在东西和南北两个方向均呈现先减后增的趋势，2015 年则整体呈从东南向西北增加的趋势；气候因子、海拔、土壤质地、土壤类型等自然因素和土地利用、施肥、种植结构以及农业机械化等人为因素共同导致了TN时空分异，人类对土壤养分干预作用表现出增强的趋势。考虑到TN含量存在较大的时空变异，建议建立湟水流域土壤TN含量长期监测点，并对农业氮肥的施用实行分区管理，以保障整个农业流域的可持续发展。

关键词 土壤全氮；地统计；时空变异；影响因素；湟水流域

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

氮素是植物生长最重要的养分，是评价土壤肥力的重要指标，土壤氮素的时空变化会引起全球氮“源”和“汇”间的转化，从而影响陆地生态系统的氮循环过程[1-2]。土壤全氮（TN）是衡量土壤氮素整体供应状况的主要指标，具有高度时空变异性，这种变异受气候、地形、母质、土壤类型等结构性因素及施肥、种植制度等随机性因素的综合影响[3-5]。土壤TN时空变异分析可有效地揭示时空格局与生态过程间的关系，对土壤可持续利用具有重大意义[6]。目前，关于土壤TN时空变异的研究报道已较多，研究方法从定性描述到Kriging插值、条件模拟和高精度曲面建模等定量研究[2, 7-9]；研究区域涉及东北、华北、长江中下游平原、黄土高原和东南丘陵等地[4, 10-13]；研究单元涉及田块、小流域和行政区划[3, 11, 13]；研究尺度包括空间尺度和时间尺度[8, 14-16]。分析大尺度上的土壤TN空间变异，可为高精度土壤TN信息的获取，土壤环境和农业宏观管理决策的有效实施等提供可靠的数据基础[10, 13, 15-16]；中小尺度上的土壤TN空间变异研究有利于改善田间管理，合理布局种植结构，制定有效的施肥方案[3, 8, 11, 14]。今后对长时间序列TN空间定量估测是数字土壤技

* 国家自然科学基金项目（41301230、41571212）、国家科技基础工作专项项目（2014FY110200A04）和2016年青海省重点实验室项目资助 Supported by the Natural Science Foundation of China（Nos.41301230、41571212）,National Science and Technology Basic Work Special（No.2014FY110200A04）and Key Laboratory of Qinghai Province in 2016 year

† 通讯作者：赵 霞（1975—），女，青海贵德人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事水土资源研究。E-mail：zhaoxia@qhnu.edu.cn

作者简介：代子俊（1989—），女，山西省大同市人，硕士研究生，主要从事资源环境与生态评估研究，E-mail：18609788368@163.com

收稿日期：2017-05-13；收到修改稿日期：2017-06-26; 优先数字出版日期（www.cnki.net）：2017-07-10

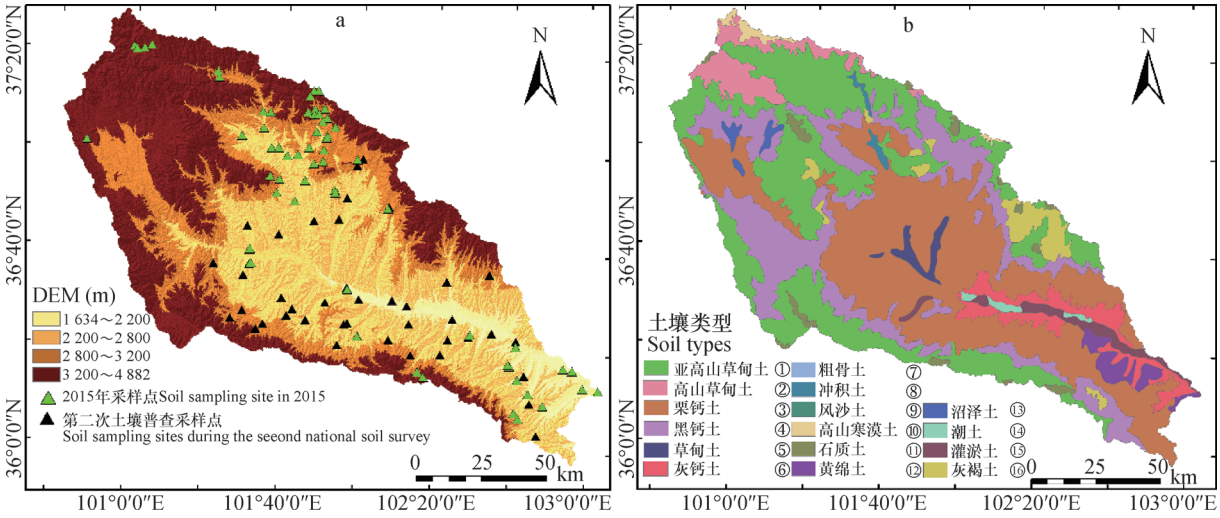
术、精准农业技术甚至生态环境建设的必经之路。迄今关于青海土壤TN时空分异的研究甚少，仅有彭景涛等[16]青海三江源地区退化草地方面的报道。而以农业流域为单位的案例更是鲜见报道。农业流域的土壤受人为和自然双重影响，研究其土壤TN的时空变异可以更准确地揭示人为及自然因素对土壤TN时空分异的影响，有助于指导流域的土壤合理施肥和可持续利用。为此，本研究以青海省主要农业生产基地—湟水流域为研究区，以20世纪80年代中期开展的第二次全国土壤普查数据和2015 年进行的土壤调查采样实测数据为基础，分析探讨了土壤TN的时空分异特征及其影响因素，旨在为湟水流域土壤氮素科学管理和土壤TN数字制图提供一定参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

湟水流域位于青海省东北部，地处青藏高原与黄土高原过渡地带，介于36°02′～37°28′N和100°42′～103°04′E之间，流域面积约162.4万 hm^2（见图1）。湟水流域是青海省政治、经济、文化和交通中心，流域内人口约占全省的60%，工农业总产值约占全省的54%[17]。流域海拔介于1 634～4 882 m之间，地势西北高东南低，地貌类型复杂多变，以黄土地貌发育最为典型，沟壑纵横。属于高原干旱半干旱大陆性气候，流域年均温度2.5～7.5℃，降水量350～600 mm，蒸发量80～1 000 mm。

根据《青海土壤》[18]、《青海土种志》[19]及1∶50万青海省土壤类型图，湟水流域共有16种土壤类型，其中面积在6万 hm^2以上土壤主要有：栗钙土、亚高山草甸土、黑钙土、灰钙土和高山草甸土，合计面积约占流域总面积的90%。其中，川水区（指海拔1 650～2 200 m河谷地区）土壤类型以灰钙土为主，浅山区（指海拔2 200～2 800 m低山丘陵区）以栗钙土为主，脑山区（指海拔2 800～3 200 m山区）以黑钙土为主，石山林区（指海拔3 200～4 800 m山区）以亚高山草甸土和高山草甸土为主。川水区和浅山区现大部分为农田，主要种植小麦、青稞、豌豆、马铃薯和油菜等；脑山区和石山林区主要是森林草灌[20]。



①Subalpine Meadow Soil；②Alpine Meadow Soil；③Kastanozems；④Chernozem；⑤Meadow Soil；⑥Sierozem；⑦Regosols；⑧Alluvial Soil；⑨Aeolian Sandy Soil；⑩Alpine Frost Desert Soil；⑪Histosols；⑫Cultivated Loessial Soil；⑬Bog Soil；⑭Moisture Soil；⑮Anthropogenic-alluvial Soil；⑯Grey-cinnamon Soil

图1　典型剖面样点(a)及土壤类型(b)

Fig. 1　Typical profile sites(a)and soil types (b) in the Huangshui River Basin

1.2　数据来源

青海省第二次土壤普查时期数据主要源于《青海土壤》[18]和《青海土种志》[19]，其中分布在湟水流域的剖面样点共45 个（图1），合计175个土层。第二次土壤普查资料剖面样点位置主要依据其描述记录的大致地点信息以及景观信息，结合行

政区划、地形地貌、土地利用、土壤类型分布等确定。

2015年湟水流域典型样点布设方法为：收集流域1∶50万的土壤图、1∶400万地质图、交通图、土地利用类型图、行政区划图等资料，以及湟水流域的气温和降水数据，统计流域土壤图上的土壤类型、分布、图斑数量及大小等基本情况，按照每个土壤类型提取10～20个典型图斑的方法筛选出拟采图斑；叠加流域土地利用图，提取拟采样图斑的土地利用类型，尽量使每个土壤类型的每种土地利用类型至少有2～5个拟采图斑；叠加流域水系、道路、行政区等基础地理底图，根据拟采图斑的可达性最终确定了61个典型样点位置（图1）。野外调查采样时，挖掘1.2 m(深)或至基岩出露(基岩出露面浅于1.2 m)×1 m（宽）的标准土壤剖面，划分发生层并采集发生层土样，每层采集1.5kg土样，同时记录样点经纬度坐标和剖面信息、景观信息、土地利用、施肥、灌溉、轮作等耕作管理信息。采样时间为2015年8月，61个土壤剖面共采集了268个土层样品。土样经风干、去杂后研磨过100目（0.154 mm）尼龙筛，利用凯氏定氮法测定TN含量[21]，使用Beckman Coulter Co.LS32激光粒度分析仪测定颗粒组成[22]。

1.3 数据处理

（1）数据标准化两期土壤剖面数据的发生层划分深度上下限在不同剖面之间不统一，为便于土壤全氮的空间插值和两期数据比较，对两期分层土壤TN数据均进行了深度加权处理[23]，生成了0～15、15～30 cm两个深度层次的全氮数据，计算公式为：

$$C_{d'-d}=\sum C_i\times\frac{H_i}{d'-d} \qquad [1]$$

式中，$C_{d'-d}$表示归一化后相应土层的TN含量，d'和d表示原始分层的上下限值，C_i表示剖面第i层TN含量（g kg^{-1}），H_i为i层在d'至d的深度（cm）。

（2）统计分析土壤TN的异常值通过数据的平均值±3标准差筛选剔除[16]，两期表层数据均无异常值，亚表层1985年剔除1个样点，2015年剔除3个样点。在IBM Statistics SPSS20.0中运用相关分析和方差分析对数据进行描述性统计分析，通过峰度、偏度及K-S检验（p>0.05）对两期数据进行正态性检验，采用最小显著性差异法（LSD）进行方差齐性检验[24]。

（3）地统计分析在对土壤TN进行空间插值之前，首先在GS+9.0软件支持下进行半变异函数分析，然后根据计算出的半变异函数值，选择合适的模型，最后将最优的模型和参数输入到ESRI GIS10.1中完成空间插值，以进一步研究区域化变量的空间变异性[25]。利用ArcGIS10.1中栅格计算器工具对两期TN空间插值的栅格数据进行差值计算，得到90 m×90 m近30 年流域土壤TN含量变化图。

（4）其他数据地形因子提取自青海省30 m×30 m数字高程图，土地利用数据提取自青海省2015 年LUCC图；气候数据来自中国气象局气象数据中心(http://data.cma.cn)，首先在ArcGIS10.1中对青海省1985 年和2015 年各自35个气象站点数据进行普通克里格插值，然后提取采样点气温、降水数据；施肥量数据源于1986年和2016年西宁市、海东市和海晏县统计年鉴[26-31]。

2 结果与讨论

2.1 1985年和2015年湟水流域土壤TN基本特征

表1为两期数据描述性统计情况，结果显示：2015 年表层和亚表层土壤TN数据符合正态分布，1985 年两层土壤TN数据经对数转换后均符合正态分布。对比两期同一层数据，2015 年两层TN均值均较1985 年高，0～15 cm层增幅为69.20%，15～30 cm层增幅为80.87%。两期TN均值均表现为从表层到亚表层降低，1985年15～30 cm土层较0～15 cm土层降低了0.18 g kg^{-1}，降幅为13.53%；2015年降低了0.17 g kg^{-1}，降幅为7.56%。

变异系数用来反映变量的变异程度，通常认为变异系数<10%为弱变异性，介于10%～100%间为中等变异性，>100%为强变异性[11]。据表1显示：两期TN数据表层和亚表层均呈中等变异水平。2015 年0～15 cm土层、15～30 cm土层TN的变异系数均分别较1985年高出9.3和2.6个百分点；1985年从表层到亚表层TN变异性增加，增加6.5 个百分点；而2015年从表层到亚表层减小，减少0.2个百分点。

表1　1985年和2015年湟水流域土壤TN描述性统计结果

Table 1　Descriptive statistics of soil TN contents in the Huangshui River Basinin 1985 and 2015

年份 Year	层次 Layer(cm)	样点数 Samplenumber	平均值 Mean（g kg^{-1}）	最大值 Max（g kg^{-1}）	最小值Min（g kg^{-1}）	标准差 SD	变异系数CV（%）	峰度 Kurt-osis	偏度 Skew-ness	K-S
1985	0～15	45	1.33	3.49	0.32	0.78	58.65	0.16	0.16	0.64
	15～30	44	1.15	3.75	0.26	0.75	65.22	0.05	0.24	0.85
2015	0～15	61	2.25	5.87	0.23	1.53	68.0	-0.41	0.78	0.10
	15～30	58	2.08	5.54	0.23	1.41	67.79	-0.59	0.69	0.16

2.2　1985—2015年湟水流域土壤TN空间分布特征

（1）空间结构特征。采用半变异函数拟合最优模型和参数，进而分析两期各层土壤TN的空间变异结构。拟合得到的模型及参数见表2，1985年两层TN数据均采用指数模型拟合，2015年0～15 cm层采用高斯模型拟合，15～30 cm层采用球面模型拟合，且两期各层数据的决定系数均较大、残差较小，表明模型选取基本合理，适合对其进行空间预测分析。

块金系数$C_0/(C_0+C)$是块金值与基台值的比值，用来反映变量空间相关性程度，该值越大表明空间变异程度主要由随机部分引起，值越小说明空间变异程度主要由结构性因子引起，若$C_0/(C_0+C)<25\%$代表变量具有强空间相关性；若$25\%<C_0/(C_0+C)<75\%$则为中等空间相关性；若$C_0/(C_0+C)>75\%$为弱空间相关性，此时变量分布随机性大，不适合用空间插值法估测[2]。半方差函数结果（表2）显示，1985 年各分层TN的块金系数均<25%，属于强的空间相关性，说明1985 年TN空间分布主要受地形、母质、气温降水等结构性因素的影响，2015年表层及亚表层的块金系数均介于25%～75%间，属于中等空间自相关性，表明这一时期TN空间分布是结构性因素和随机性因素综合作用的结果。由于湟水流域是青海省重要的农业区，两期同一层数据块金系数的增加反映了30 年来人类活动等随机因素对流域TN的影响趋向频繁化，长期水耕熟化、培肥种植等外部因素使得近几 年TN的空间相关性减弱；就同期不同分层的块金系数而言，1985 年亚表层块金系数与表层相比增加了0.87%，空间相关性轻微减小，2015年亚表层与表层块金系数相等为50%，说明近几 年流域土地利用方式的改变、施肥量以及种植结构的改善等随机部分对土壤全氮干预作用加强，影响范围已扩大至亚表层的土壤。变程表示变量空间自相关的范围，变程需大于采样间距的最大值，在变程范围内的变量才有空间自相关性，本研究中两期数据的变程均大于采样间距最大值16.62 km和39.76 km，满足空间自相关条件。就同期不同层次的变程而言，两期均表现为表层大于亚表层，说明TN在土壤表层的空间作用范围大于亚表层。

表2　1985年和2015年湟水流域土壤TN含量半变异函数的理论模型与参数

Table 2　Semi-variogram models and parameters for soil TN contents in the Huangshui River Basin in 1985 and 2015

年份 Year	层次 Layer（cm）	理论模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数 C_0/C_0+C（%）	变程 Range（km）	决定系数 R^2	残差 RSS
1985	0～15	指数Exponent	0.02	0.30	8.42	22.50	0.72	0.01
	15～30	指数Exponent	0.03	0.37	9.29	22.20	0.59	0.03
2015	0～15	高斯Gaussian	1.57	3.13	50.00	121.93	0.78	0.70
	15～30	球面Spherial	1.07	2.15	50.00	82.00	0.81	0.31

（2）土壤TN丰缺特征与空间分布特征。根据半方差函数的结果进行普通克里格插值，得出整个湟水流域土壤TN空间分布格局(图2)，结合地形图和土壤类型图可发现两期TN的高值区分布情况相似，主要

分布于流域北、西北边缘的高海拔地区以及亚高山草甸土和黑钙土发育的地区。土壤TN含量划分六个等级：1级（>2.0 g kg^{-1}）、2级（1.5 ~ 2.0 g kg^{-1}）、3级（1.0 ~ 1.5 g kg^{-1}）、4级（0.75 ~ 1.0 g kg^{-1}）、5级（0.5 ~ 0.75 g kg^{-1}）和6级（<0.5 g kg^{-1}）[18]。由于研究区TN2.0 g kg^{-1}的面积分布较广且最大值域较2 g kg^{-1}大很多，按全国分级标准不能准确地反映流域高值区的细节特征，因此本研究将>2.0 g kg^{-1}的部分再细分为2.0 ~ 2.5 g kg^{-1}、2.5 ~ 3.0 g kg^{-1}、3.0 ~ 3.5 g kg^{-1}和>3.5 g kg^{-1} 4个等级，故流域TN含量共划分为9个等级，其中1 ~ 5级含量属丰富级水平、6、7级属中等水平、8、9级属缺乏。

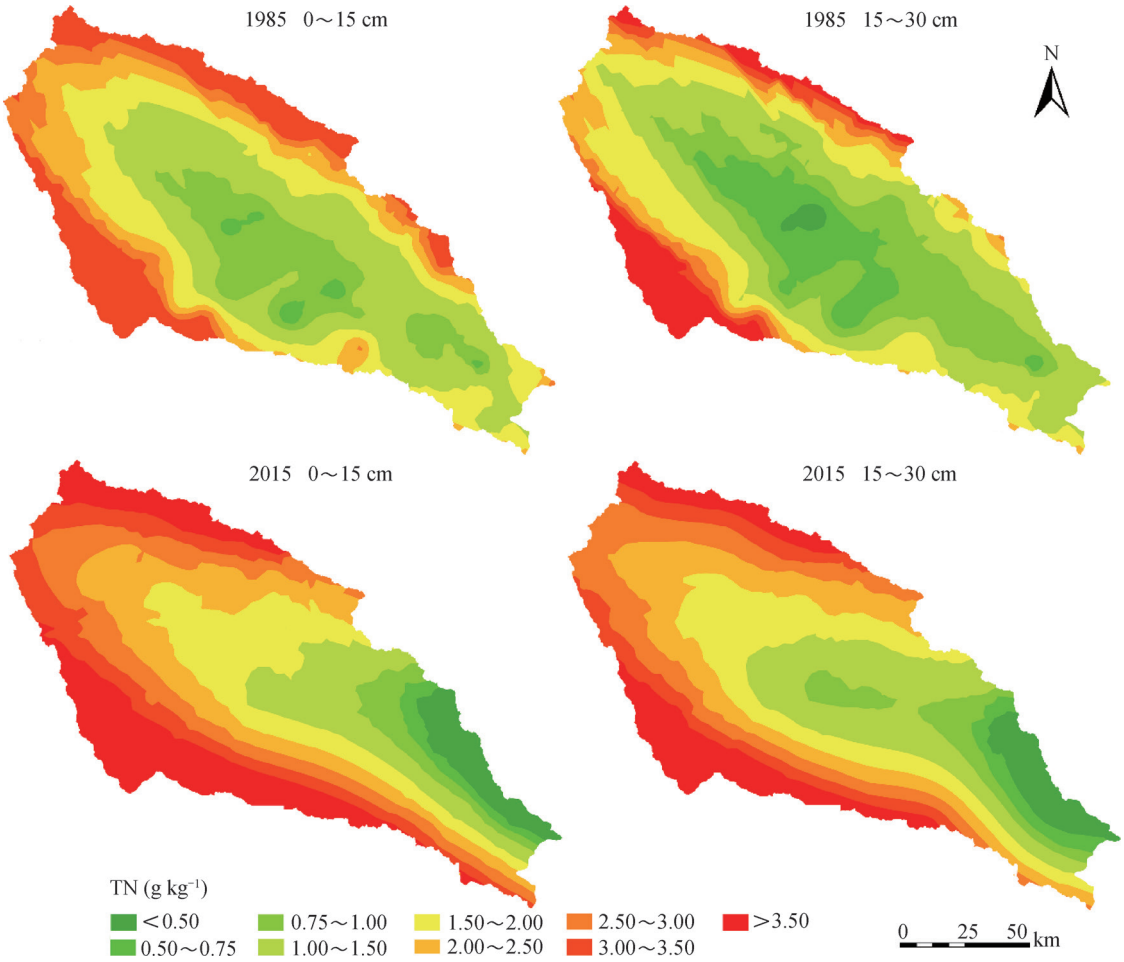


图2 1985年和2015年湟水流域土壤TN含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil TN contents in the Huangshui River Basin in 1985 and 2015

从0 ~ 15 cm层TN空间含量丰缺程度看：1985 年土壤TN含量属于丰富水平的占流域总面积的55.01%，主要分布在石山林区亚高山草甸土及高山草甸土上；属中等的占43.46%，主要分布在石山林区边缘的亚高山草甸土、脑山区黑钙土及部分浅山区栗钙土上；属缺乏的占1.52%，集中分布在流域中部浅山旱地区及川水区。2015 年TN含量属于丰富的占流域总面积的77.47%，分布区从1985 年该等级分布的石山林区扩增至脑山区；属中等的占15.41%，主要分布在石山林区亚高山草甸土及高山草甸土上；属缺乏的占7.61%，集中分布在流域东南地势平坦的川水区。

从各分层TN含量不同等级分布状况看：1985 年流域内表层和亚表层TN含量在东西和南北两个方向均呈现出先减后增的整体趋势，低值区到高值区以环形向外扩散，其中15 ~ 30 cm层与0 ~ 15 cm层相比分布较零散，但整体趋势并无太大变化，局部相对明显的变化出现在表层未见>3.5 g kg^{-1}的1级区，分布于流域西北边缘石山林区的4级以上区面积明显减少，降幅为36.02%，流域中部川水区的7级以下面积明显增加；2015 年流域内两层TN含量整体呈现出从东南向西北增加的

趋势，亚表层较表层在流域中部川水区和西北部边缘石山林地区变化明显，具体表现为中部的6级区面积明显增加，增幅为52.69%，西北边缘的2级区面积减小，降幅为28.07%，其他几个等级的TN含量空间分布上变化不明显。

（3）空间预测精度验证。图3为两期TN普通克里格插值的空间分布预测误差图，预测标准差图可以反映插值结果的可靠性，值越小表示插值结果越可靠，值越大则插值结果可靠性降低。由图3可知，1985年流域TN插值可靠性较高的区域（预测误差<1）约占整个流域的60%，分布在流域中部和西南部，可靠性差的区域（预测误差>1）主要分布在西北边缘地区；2015年流域TN插值估计的可靠性较1985年高，95%以上的区域达到了较高的可靠性水平（预测误差<1）。本研究区面积较大，实际采样点并未完全覆盖整个流域，但两期插值标准差分析表明，空间预测图可有效反映流域TN空间分布情况。

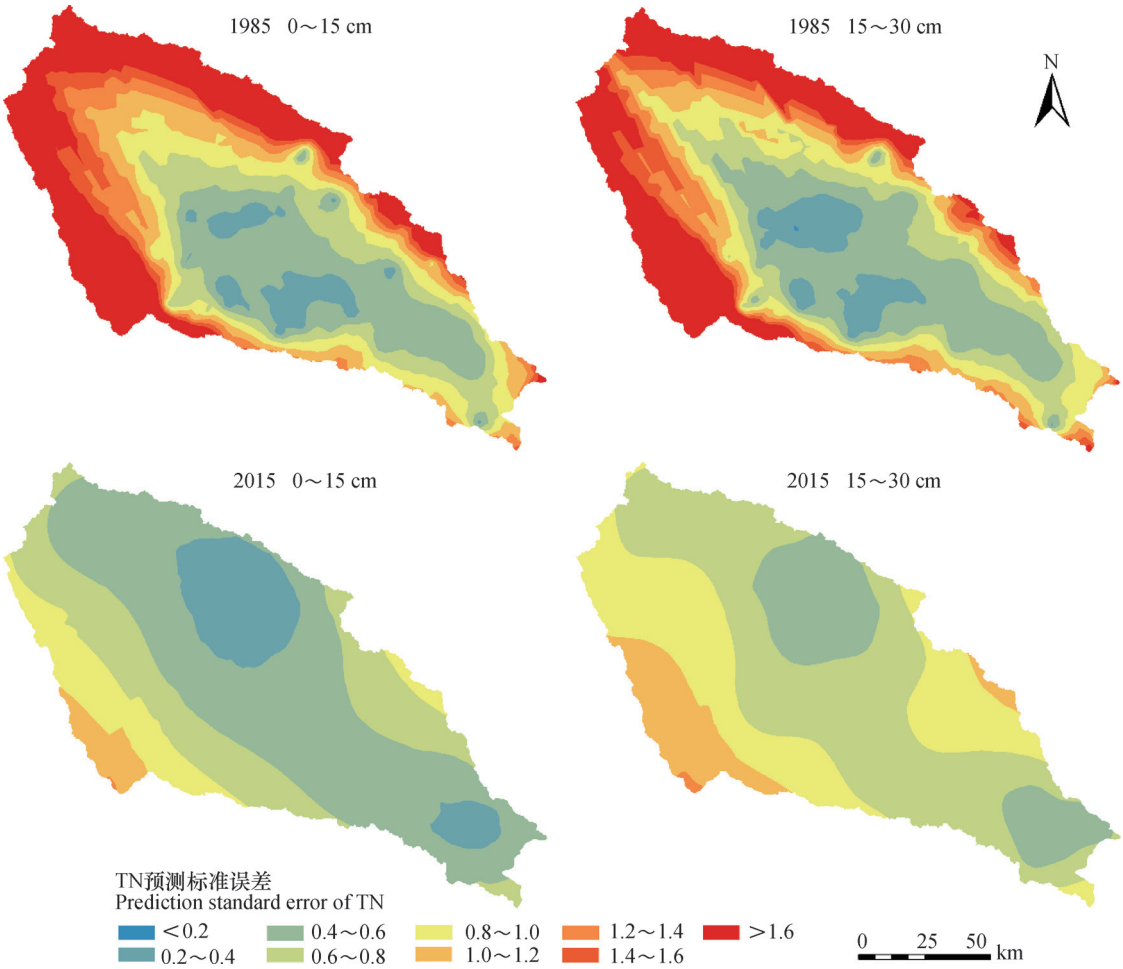


图3　1985年和2015年湟水流域土壤TN含量空间插值预测标准误差图

Fig. 3　Standard deviation of kriging-based prediction of soil TN content in the Huangshui River Basin in 1985 and 2015

2.3　湟水流域土壤TN的时间变化

依据图4可知，近30 年TN含量总体呈增加趋势，局部出现减少现象。0～15 cm表层土壤TN含量增加的面积占流域总面积的80.26%，减小的面积占流域总面积的19.74%，其中增加最明显的等级为0.5～1.0 g kg^{-1}，占该层增加总面积的47.05%，集中分布于流域西北石山林区及中部浅山耕地区，减少的区域主要分布在流域东部边缘脑山区和东南部地势平坦的川水区。15～30 cm亚表层TN含量增加的面积占流域总面积的84.50%，减小的面积占流域总面积的15.50%，其中增加最明显的等级为0.5～1.0 g kg^{-1}，占该层增加总面积的39.06%，穿插分布于流域西北及中部地区，减少最明显的等级为0.0～0.5 g kg^{-1}，占该层减少总面

积的55.88%，主要分布在流域东南地势平坦的川水区。

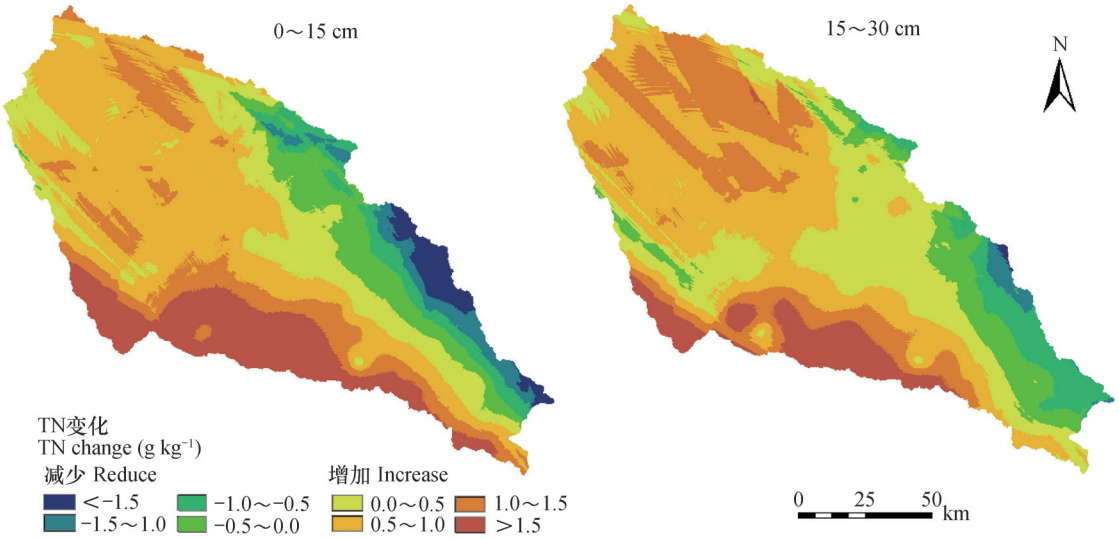


图4 近30年湟水流域土壤TN含量变化图

Fig. 4 Spatial variation of TN content in the Huangshui River Basin from 1985 to 2015

2.4 湟水流域土壤TN空间分布格局的影响因素

结合已有研究成果[2-16]及研究区实际情况本文选取气温、降水、海拔、土壤类型、砂粒、土地利用方式、种植结构和农业机械化水平等8 种因子分析其对流域土壤全氮空间分布的影响，部分因子与TN相关分析结果见表3。

表3 各影响因子与土壤TN的相关性

Table 3 Correlations of soil TN with various influence factors

年份 Year	层次Layer (cm)	年均气温 Annual temperature	年均降水量 Annual precipitation	海拔 Altitude	砂粒含量 Sand
1985	0 ~ 15	-0.57*	0.46*	0.56*	-0.25
	15 ~ 30	-0.50*	0.39*	0.48*	-0.26*
2015	0 ~ 15	-0.44*	0.24*	0.70*	-0.34*
	15 ~ 30	-0.53*	0.29*	0.75*	-0.48*

注：*表示显著性水平$p<0.05$ Note: The data affixed with "*" are significant at level $p<0.05$

（1）气候因子。通常情况下，年均温度范围内气温每升高10 ℃，土壤氮素的含量降低12.5% ~ 25%[32]。气温和降水相关分析结果表明（表3），气温与TN呈负相关，降水与TN呈正相关，一般而言，在同一时期，气温低和降雨量大的地区有利于土壤全氮积累。由于研究区尺度较大，气候因子的地带性得以体现，气候直接影响土壤养分元素的迁移转化过程，且决定着母质分化及成土过程的方向和强度，同时影响农作物的生长状况及土壤氮素的合成、分解，因此研究区西北部石山林、脑山低温地区较东南部气候适宜的川水区TN含量高，这与曹祥会等[10]的碳氮分布特征及影响因素研究结果一致。

（2）海拔。海拔与土壤TN含量具有显著正相关（$p<0.05$），程先富等[2]也得出了相似的结果。本研究与之相同点在于研究区海拔介于1634 ~ 4882 m之间，高差比较大，土壤养分及植被类型等环境因子的垂直地带性得以体现。原因在于地形对水热条件、土壤物质进行了再分配，青藏高原上海拔越高的地方温度越低降雨量反而越多，这种独特的垂直地带性气候条件下土壤微生物活动受到限制，利于土壤养分中有机质、氮素等的积累。全氮含量空间分布与流域西北高东南低的地势呈现相同趋势。

（3）土壤类型。湟水流域主要土壤类型有亚高山草甸土、高山草甸土、黑钙土、栗钙土和灰钙土5 种。由于第二次土壤普查时期采样点未落在亚高山草甸土、高山草甸土上，所以本研究选取黑钙土、栗钙土、灰钙土3种类型土壤进行分析。表4是方差分析的不同土壤类型组间的TN含量差异显著（$p<0.05$），这与邢喆等[11]、赵燕婷等[12]的研究结果一致。两期数据TN含量均值均表现为黑钙土>栗钙土>灰钙土，且黑钙土与栗钙土、灰钙土对TN含量的影响差异显著（$p<0.05$），由于流域内脑山区气候较为湿润，土壤主要为黑钙土，具有厚实的腐殖质表层，因此TN含量较高；而川水区和浅山区气候较为干旱，土壤多为栗钙土和灰钙土，微生物分解作用较强，不利于TN等土壤养分的积累，因此TN相对较低。

表4　主要土壤类型TN含量比较

Table 4　Comparison of three major soil types in soil TN content

土壤类型 Soil type	年份 Year	0 ~ 15 cm		15 ~ 30 cm	
		均值Mean	标准差SD	均值Mean	标准差SD
黑钙土 Chernozem	1985	2.40a	0.76	2.32a	0.83
	2015	2.59A	1.33	2.29A	1.09
栗钙土 Kastanozems	1985	1.04b	0.34	0.82b	0.29
	2015	1.65B	0.97	1.37B	0.82
灰钙土 Sierozem	1985	0.80b	0.34	0.81b	0.35
	2015	0.67B	0.07	0.42B	0.08

注：不同大小写字母分别表示在显著性水平$p<0.05$下，前后两期各土壤类型间TN含量存在显著差异 Note: Different uppercase and lowercase letters represent significance at level $p<0.05$, significantly different between the two period in soil TN relative to soil type

（4）砂粒含量。砂粒含量与TN呈显著负相关（$p<0.05$），由于质地比较黏重的土壤保水保肥能力较强，TN含量也相应较高，质地较砂的土壤保水保肥能力较差，土壤养分分解速度快，因此TN含量低，这与刑喆等[11]的研究结果一致。流域西北部主要是砂粒含量偏低（42.70% ~ 58.36%）的亚高山草甸土，东南部川水区主要发育砂粒含量偏高（61.16% ~ 65.61%）的灰钙土，这也是TN高值区和低值区分别出现在西北部、东南部的原因之一。

（5）人为因素。受地形、气候因子和人类扰动的综合影响，湟水流域植被分布情况也具有地域差异，因此土地利用方式一定程度影响土壤全氮的分布，石山林区和脑山区以林灌草自然植被为主，植被覆盖率高，且随海拔增加，覆盖率增加，地表的枯枝落叶增加，土壤养分来源更加丰富，积累的TN含量普遍较高。浅山区和川水区海拔较低、地势相对平坦，该区土壤养分情况主要受人为因素影响，耕作制度、施肥等因素不同程度地影响着土壤TN的含量。

从受人类扰动影响最显著的耕地来看，种植结构、农业机械化等人为活动均会导致流域土壤TN空间分布的地域差异，结合表2块金系数可知，土壤二次普查时期自然因素在流域TN空间分布中起主导作用，因此1985年TN空间分布图（图2）展现的TN空间格局基本与流域的地形和土壤类型等结构性因子的分布趋势一致；2015年TN含量的空间分布格局与地形等结构性因子的分布出现明显差异，主要是随机性因子的作用增加所致，统计资料显示[26-31]，2015年流域东南部民和、乐都和互助县的农作物种植结构中粮食作物占比较高，均高于55%，北部和西部的大通、湟中及湟源县则是经济作物和蔬菜占比较高，两者之和均高于30%，由于经济作物和蔬菜的经济收益较粮食作物高，所以这些县区的农民对耕地管理相对精细，施肥量也较多，导致土壤TN含量高于其他地区。西部湟中和湟源等农业大县的机械播种面积和机械耕地面积均占耕地总面积的40%左右，东南部的乐都县仅占20%左右，地区间机械化水平的差异也会造成土壤养分的空间分异。

2.5 湟水流域土壤TN时间变化的影响因素

（1）气候因子。据气象资料显示，1960—2010 年，青海气温和降雨量均表现出升高的趋势，增加幅度分别为0.0354 ℃10 a^{-1}和0.5227 mm 10 a^{-1}[33]。1985—2015 年降雨量和TN同时升高从前文所述的两者关系上理解是正常的，而气温升高也导致TN增加，可以理解为对于地处西部温度偏低的青海而言，气温适度提升有利于作物/植物的生物量提高，加大了秸秆还田量和土壤中残留的根系，从而有利于TN的积累，因此气候变化是1985—2015 年期间土壤TN增加的驱动力。

（2）人为因素。从半变异函数参数分析得到，流域30年来随机因素对TN变异的影响逐渐加重，为进一步了解人为因素对TN时间变化的影响，本文收集到了1986年和2015年湟水流域统计年鉴数据。土地利用方式的改变会影响TN在时间上的变异，依据统计资料[26-31]，30年来湟水流域耕地面积明显增加，从1985年的约32 万 hm^2增加至2015年的43 万 hm^2左右，其中水浇地增加了约10 万 hm^2，经长期水耕熟化的土壤TN含量会明显增加，且土壤处于嫌气条件时会抑制TN的分解，导致TN含量增加。

湟水流域农用化肥施用量（实物量吨）由1986 年的8.68 万吨增加至2015年的15.55 万吨，其中氮肥施用量增加了0.87 万吨，施肥量的增加提高了作物的生物量，增加了残留在土壤中根系量和还田的秸秆量，从而使得土壤TN等养分元素更多的积累下来；加之近几年流域各县根据各地实际情况按测土配方施肥技术对农田进行合理施肥管理，有效改善了土壤养分空间分布不均匀现象，因此，对于研究区这类农业流域而言施肥量也会影响土壤TN的时空分布。农作物种植结构的调整会影响培肥方案的设计最终影响土壤TN的变异，资料显示[26-31]，1986年流域内农作物播种面积中粮食作物播种面积所占比例高达84.68%，至2015年下降为54.74%，与此同时，从1986—2015年，经济作物播种面积从12.5%增加至25.7%，蔬菜从1.2%增加至14%。经济作物和蔬菜均属于耗水、耗肥的作物，且经济效益较农作物要高，农民投入变高，土壤管理、肥料施用等均较80年代有了很大改善，这也是30年来土壤TN增加的主要原因之一。

农业现代化水平同样能影响土壤TN时间演替，据统计[26-31]，30年来全流域的机械耕地面积、机械播种面积和机械收割面积均明显增加，分别从1986年的3.05 万 hm^2、2.38 万 hm^2和0.004万 hm^2，增加至2015年的20.02 万 hm^2、12.35 万 hm^2和8.01 万 hm^2。机械化水平的提高反映了人类对流域土壤的扰动作用在逐步加强，导致土壤TN的空间相关性减弱，在提高耕地质量、改善生产条件的同时也促进了湟水流域现代化农业的发展。特别是2012 年开展湟水流域高标准基本农田整治重大项目以来，“旱变水”、“坡改梯”等项目的推进使流域内沙化、盐碱化的耕地得到一定治理，土壤质量有所提高，耕地的保水、保肥能力增强，水土流失现象减少，也可以有效提高耕地土壤的TN含量。此外需要指出的是，研究区第二次土壤普查的剖面点与2015 年采集的剖面点在空间位置和分布格局上并不完全一致，存在一定差异，由此可能对部分区域近30年土壤全氮变化量甚至趋势分析结果带来一定的不确定性。

3 结 论

近30年，湟水流域0 ~ 15 cm和15 ~ 30 cm土壤全氮呈现增加趋势，其中西部、北部、中部以增加为主，东南部以递减为主；空间相关性由强变为中等，1985 年TN含量在东西和南北两个方向均呈现先减后增的趋势，2015 年则整体呈现从东南向西北增加的趋势；气候因子、海拔、颗粒组成、土壤类型等自然因素与土地利用、施肥、种植结构和农业机械化等人为因素共同导致了TN时空分布的差异，但人类对土壤养分干预作用表现出增强的趋势。考虑到TN含量存在较大的时空变异，建议对湟水流域土壤TN含量进行长期监测，对农业氮肥的施用实行分区管理，以保障整个农业流域的可持续发展。

参 考 文 献

[1] Córdova C，Sohi S P，Lark R M，et al. Resolving the spatial variability of soil N using fractions of soil organic matter. Agriculture，Ecosystems & Environment，2012，147（15）：66—72

[2] 程先富，史学正，于东升，等. 基于GIS 的土壤全氮空间分布估算——以江西省兴国县为例. 地理研究，2007，26（1）：110—116
Cheng X F，Shi X Z，Yu D S，et al. Spatial

estimation of soil total nitrogen using GIS：A case study in Xingguo County Jiangxi Province（In Chinese）. Geographica Research，2007，26（1）：110—116

［3］ 徐国策，李占斌，李鹏，等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布. 地理学报，2012，67（11）：1547—1555
Xu G C，Li Z B，Li P. et al. Spatial distribution of soil total nitrogen in a typical watershed of the middle Danjiang River（In Chinese）. Acta Geographica Sinica，2012，67（11）：1547—1555

［4］ Wei J B，Xiao D N，Zeng H，et al. Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region，northeastern China. Environmental Geology，2008，53：1663—1672

［5］ Darilek J L，Huang B，Wang Z G，et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region of China. Agriculture，Ecosystems & Environment，2009，129：286—292

［6］ Ettema C H，Wardle D A. Spatial soil ecology. Trends in Ecology & Evolution，2002，17：177—183

［7］ Burrough H P. Soil variability：A late 20th century view.Soils and Fertilizers，1993，56（5）：529—562

［8］ 程先富，孙鸿鹄，张国耀，等. 大别山区龙潭小流域土壤全氮和有效磷的空间变异及条件模拟. 应用与环境生物学报，2014，20（2）：281—285
Cheng X F，Sun H H，Zhang G Y，et al. Spatial variability and conditional simulation of soil total nitrogen and available phosphorus in Longtan watershed of the Dabieshan Mountain，China（In Chinese）.Chinese Journal of Applied Environmental Biology，2014，20（2）：281—285

［9］ 史文娇，岳天祥，石晓丽，等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展. 自然资源学报，2012，27（1）:163—175
Shi W J，Yue T X，Shi X L，et al. Research progress in soil property interpolators and their accuracy（In Chinese）. Journal of Natural Resources，2012，27（1）:163—175

［10］ 曹祥会，龙怀玉，周脚跟，等. 河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析. 植物营养与肥料学报，2016，22（4）：937—948
Cao X H，Long H Y，Zhou J G，et al. Analysis of spatial variability and influencing factors of topsoil organic carbon and total nitrogen in Hebei Province（In Chinese）. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2016，22（4）：937—948

［11］ 邢喆，黄标，董成森，等. 江苏省沭阳县农田土壤有机质和全氮的时空变异及其影响因素. 土壤，2013，45（3）：405—411
Xing Z，Huang B，Dong C S，et al. Tempo—spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in farmland and its affecting factors in Shuyang County，Jiangsu Province（In Chinese）. Soils，2013，45（3）：405—411

［12］ 赵燕婷，常庆瑞，李志鹏，等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征.农业机械学报，2014，45（8）：140—148
Zhao Y T，Chang Q R，Li Z P，et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei tableland area（In Chinese）. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery，2014，45（8）：140—148

［13］ 邵娜，张认连，张维理，等. 大尺度采样下不同模型方法预测土壤全氮空间分布研究——以海南岛为例. 中国土壤与肥料，2015（6）：9—17
Shao N，Zhang R L，Zhang W L，et al. Spatial prediction of soil nitrogen by different methods in large scale —A case study of Hainan Island（In Chinese）. Soil and Fertilizer Sciences in China，2015（6）：9—17

［14］ 谷海斌，王泽，武红旗，等. 不同开垦年限土壤养分和盐分时空分布特征研究.干旱区农业研究，2016，34（3）：8—15
Gu H B，Wang Z，Wu H Q，et al. Research on temporal and spatial distribution characteristics of soil nutrient and salt under different reclamation years（In Chinese）. Agricultural Research in the Arid Areas，2016，34（3）：8—15

［15］ 赵小敏，邵华，石庆华，等. 近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征. 土壤学报，2015，52（4）：723—730
Zhao X M，Shao H，Shi Q H，et al. Spatial—temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2015，52（4）：723—730

［16］ 彭锦涛，李国胜，傅瓦利，等. 青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征. 环境科学，2012，33（7）：2490—2496
Peng J T，Li G S，Fu W L，et al. Temporal—spatial variations of total nitrogen in the degraded grassland of Three—River headwaters region in Qinghai Province（In Chinese）. Environmental Science，2012，33（7）：2490—2496

［17］ 周宏伟，梁建芳. 湟中县域土壤养分变化分析. 青海林

业科技，2014（3）：4—7
Zhou H W，Liang J F. Analysis on soil nutrient content change in Huangzhong County（In Chinese）. Journal of Qinghai Forestry Science and Technology，2014（3）：4—7

［18］ 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤. 北京：中国农业出版社，1997：140—240
Office of Agricultural Resources Division in Qinghai. The soil of Qinghai Province（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，1997：140—240

［19］ 青海省农业资源区划办公室. 青海土种志. 北京：中国农业出版社，1995：2—327
Office of Agricultural Resources Division in Qinghai. Soil species of Qinghai Province（In Chinese）. Beijing：China Agriculture Press，1995：2—327

［20］ 熊有平. 湟水流域川水区、浅山区、脑山区和石山林区划分及特点. 水利科技与经济，2012，18（2）：14—15
Xiong Y P. Division and characteristics of Chuanshui region，Qianshan region，Naoshan region and Shishan and forest region in Huangshui River Basin（In Chinese）. Water Conservancy Science and Technology and Economy，2012，18（2）：14—15

［21］ 张甘霖，龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京：科学出版社，2012
Zhang G L，Gong Z T. Soil survey laboratory methods（In Chinese）. Beijing：Science Press，2012

［22］ 杨艳芳，李德成，杨金玲，等. 激光衍射法和吸管法分析黏性富铁土颗粒粒径分布的比较. 土壤学报，2008，45（3）：405—412
Yang Y F，Li D C，Yang J L，et al. Comparison between laser diffraction and pipette methods in analyses of PSD of clayey Ferrisol（In Chinese）. Acta Pedologica Sinica，2008，45（3）：405—412

［23］ 徐艳，张凤荣，段增强，等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨. 土壤通报，2005，36（6）：836—839
Xu Y，Zhang F R，Duan Z Q，et al. Calculation method for density and storage of soil organic carbon（In Chinese）.Chinese Journal of Soil Science，2005，36（6）：836—839

［24］ 赵明松，张甘霖，李德成，等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素. 生态学报，2013，33（16）：5058—5066
Zhao M S，Zhang G L，Li D C，et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province（In Chinese）. Acta Ecologica Sinica，2013，33（16）：5058—5066

［25］ 刘爱利，王培法，丁圆圆. 地统计学概论. 北京：科学出版社，2012:5
Liu A L，Wang P F，Ding Y Y. Introduction to Geostatistics （In Chinese）. Beijing：Science Press，2012：5

［26］ 西宁市统计局. 西宁市统计年鉴1986. 北京：中国统计出版社，1986
Statistical Bureau of Xining City. Statistical yearbook of Xining City 1986（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，1986

［27］ 西宁市统计局. 西宁市统计年鉴2016. 北京：中国统计出版社，2016
Statistical Bureau of Xining City. Statistical yearbook of Xining City 2016（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，2016

［28］ 海东市统计局. 海东市统计年鉴1986. 北京：中国统计出版社，1986
Statistical Bureau of Haidong City. Statistical yearbook of Haidong City 1986（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，1986

［29］ 海东市统计局. 海东市统计年鉴2016. 北京：中国统计出版社，2016
Statistical Bureau of Haidong City. Statistical yearbook of Haidong City 2016（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，2016

［30］ 海晏县统计局. 海晏县统计年鉴1986. 北京：中国统计出版社，1986
Statistical Bureau of Haiyan County. Statistical yearbook of Haiyan County 1986（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，1986

［31］ 海晏县统计局. 海晏县统计年鉴2015. 北京：中国统计出版社，2015
Statistical Bureau of Haiyan County. Statistical yearbook of Haiyan County 2015（In Chinese）. Beijing：China Statistics Press，2015

［32］ 史蒂文森，等. 农业土壤中的氮. 闵九康，等译. 北京：科学出版社，1989:11
Stevenson F J，et al. Nitrogen in agricultural soils（In Chinese）. Min J K，et al. trans. Beijing：Science Press，1989：11

［33］ 郭素荣. 1960—2010年青海省气候变化的时空特征分析. 兰州：西北师范大学，2012
Guo S R. Analysis of temporal and spatial variation of climate in Qinghai Province from 1960 to 2010（In Chinese）. Lanzhou：Northwest Normal University，2012

Spatio-temporal Variation of Soil Total Nitrogen in Huangshui River Basin and Its Affecting Factors in the Past 30 Years

DAI Zijun[1]　ZHAO Xia[1†]　LI Decheng[2]　LIU Feng[2]　SHI Pingchao[1, 3]　PANG Longhui[1]

（1 *Qinghai Normal University*, *Physical Geography and Environmental Process Key Laboratory of Qinghai Province*, *Qinghai Soil Digital Service Center*, *Xining* 810008, *China*）

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

（3 *Agriculture and Animal Husbandry Science and Technology Bureau of Songtao Miao Autonomous County*, *Songtao*, *Guizhou* 554100, *China*）

Abstract　【Objective】Nitrogen is the most important nutrient for plant growth, and so an important index for evaluation of soil fertility, too. Spatio-temporal variation of soil nitrogen can cause global nitrogen shifting between "source" and "sink", thus affecting nitrogen recycling in the terrestrial ecosystem. The study on spatio-temporal variation of soil total nitrogen (TN) may help effectively reveal relationships between spatio-temporal patterns of soil TN and ecological processes, which is of great significance to sustainable utilization of the soil resources. As in agricultural regions, the soil is subjected to dual influences, natural and artificial, the study on spatio-temporal variation of TN in the soil may help expose more accurately how artificial and natural factors affect the variation and guide rational fertilization and sustainable utilization of the soil in the regions. 【Method】 To that end, analysis was done of the data of the 45 profiles of the second national soil survey in 1985 and the 61 profile of the soil survey in 2015 in the Huangshui River Basin of Qinghai Province, using the classical statistics including descriptive statistics analysis, correlation analysis and variance analysis, and the geostatistics including semi-variance analysis and Ordinary Kriging analysis, for spatio-temporal variations of TN in the 0 ~ 15 cm and 15 ~ 30 cm soil layers and their influencing factors in the past 30 years. 【Result】Results show that: by excluding abnormalities, the data valid for analysis consisted of 45 items of the 0 ~ 15 cm soil layer and 44 items of the 15 ~ 30 cm soil layer obtained in 1985 and 61 items of the 0 ~ 15 cm soil layer and 58 items of the 15 ~ 30 cm soil layer obtained in 2015. From 1985 to 2015, the mean TN content in the 0 ~ 15 cm and 15 ~ 30 cm soil layers increased from 1.33 g kg^{-1} to 2.25 g kg^{-1} and from 1.15 g kg^{-1} to 2.08 g kg^{-1}, or by 69.2% and 80.87%, respectively, and variation coefficient of the mean soil TN increased from 58.65% to 68.0% and from 65.22% to 67.79%, respectively, which indicates that soil TN content during the period varied at a medium level; Semi-variance analysis shows that the TN data of the two soil layers in 1985 fit the Exponential model, while those of the 0 ~ 15 cm soil layer and the 15 ~ 30 cm soil layer in 2005 fit the Gaussian model, and the Spherical model, respectively. Nugget coefficients of the TN data of the two soil layers in 1985 were both <25%, exhibiting strong spatial correlations, which indicates that spatial distribution of the soil TN was mainly affected by structural factors such as topography, parent material, temperature and precipitation, while those in 2015, both varied between 25% and 75%, displaying medium spatial autocorrelations, which indicates that spatial distribution of the soil TN during this period was governed by both structural factors and random factors, simultaneously. The change in spatial distribution autocorrelation from strong in 1985 to medium in 2015 suggests that the influences of random factors

like human activities on soil TN was strengthening in the region, thus weakening the spatial distribution autocorrelation in recent years; In the past 30 years, soil TN content in the Basin was on a rising trend, demonstrated mainly in the western, northern and central parts of the region while in the southeast part it was on a reverse trend region decreased. A first-falling-and-then-rising trend was found in 1985 along the east-west and north-south directions, and in 2015 a holistically rising one was along the southeast-northwest direction. The graph of spatial distribution of standard deviations of TN content prediction demonstrates that the predicted spatial distribution map of soil TN based on Ordinary Kriging of the two lots of TN data is good enough to reflect the real situation. Natural factors, such as climate, elevation, soil texture, soil type, and so on and artificial factors, like land use, fertilization, planting structure, agricultural mechanization, etc. acted jointly causing sharp spatio-temporal variation of soil TN, and the intervention of human beings in soil nutrients exhibited an increasing trend. 【Conclusion】Considering the high spatio-temporal variability of TN content, it is suggested that a long-term soil TN monitoring system be set up in the Huangshui River Basin, and that partition management of agricultural nitrogen fertilization should be enforced, so as to ensure sustainable development of the agriculture of the whole Basin.

Key word Soil total nitrogen (TN); Geo-statistics; Spatio-temporal variability; Influential factors; Huangshui River Basin

（责任编辑：檀满枝）