

中国南北过渡带土壤碳氮空间特征 及暖温带与亚热带界限

张俊华^{1,2}, 朱连奇^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 赵 芳^{1,2}, 秦静婷^{1,2}

(1. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004;

2. 河南大学地理与环境学院, 开封 475004)

摘要: 秦巴山区是中国南北过渡带的主体, 过渡带分界划分在学界一直存在争议, 确定和改进划分指标对构建中国生态地理格局有重要作用。土壤作为过渡带的核心部分, 其关键指标的空间分布及变异机制对识别过渡效应和区域特征有指示作用。本文基于土壤二普资料, 采用空间模拟和地统计方法分析土壤有机碳/全氮空间特征及与主要自然地理要素的关系。结果显示, 秦巴山区有机碳/全氮含量空间分布趋势一致, 存在3个高值区、1个次高值区和1个低值区。高值区分布在秦岭、大巴山高海拔区域和嘉陵江以西山地, 含量分别为15.03~71.04 g/kg、1782.61~7710.00 mg/kg; 低值区沿秦岭北坡的渭河谷地、南五台山和伏牛山分布, 含量分别为0.64~6.50 g/kg、110.00~885.96 mg/kg; 次高值区主要在汉江两侧、秦巴山地之间海拔< 1000 m及嘉陵江两侧略高于1000 m的山体, 含量介于以上二者之间, 自西向东呈南北向宽幅逐渐增大的“喇叭状”趋势。综合考虑地形—植被—气候作用, 发现秦岭南坡—大巴山北坡有机碳/全氮次高值区分布范围与1000 m等高线、暖温带落叶阔叶林带(含常绿成分)和亚热带常绿落叶阔叶混交林带上限、1月0℃等温线、7月24℃等温线较一致, 区内1月、7月、季节和全年气温变化较小, 各季降雨变幅大, 该区是亚热带向暖温带过渡的主体, 北界大致沿都江堰—茂县—平武—文县和秦岭南坡1000 m等高线分布, 南以都江堰—北川—青川和大巴山北坡1000 m等高线为界。有机碳/全氮空间变化为亚热带—暖温带的划界提供一定依据, 进一步识别典型区土壤过程及生态效应, 将全面揭示土壤多维过渡特征及其变异机理。

关键词: 南北过渡带; 土壤有机碳; 全氮; 地形; 植被; 气候分界线

DOI: 10.11821/dlxb202109016

1 引言

秦岭—大巴山(秦巴山区)是中国陆地生态系统南北过渡带(区)的主体, 东西长> 1000 km, 介于102°E~114°E。区内兼具南北地理环境特点, 生物种类多样, 是中国重要的物种库。多列山体的分布及阻隔效应形成了自东向西、自南向北、自山麓向山顶特有复杂的自然环境过渡特征和特色的地域人地关系系统。作为中国自然地理的过渡地带, 必然具有气候变化的敏感性^[1]。复杂的地理环境和过渡特征对气候变化的响应程度和

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2021-07-06

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY100900); 河南省重点研发与推广专项(212102310415) [Foundation: National Scientific and Technological Basic Resources Investigation Project, No.2017FY100900; Key Research and Development Project in Henan Province, No.212102310415]

作者简介: 张俊华(1975-), 女, 河南舞阳人, 博士, 教授, 主要从事土壤碳氮特征与土壤质量研究。

E-mail: okljd@163.com

通讯作者: 李国栋(1978-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 副教授, 主要从事环境变化与地表过程研究。

E-mail: liguodong@henu.edu.cn

变化强度不同, 识别南北分界的范围和区内各环境要素的变化有助于进行中国自然区划的精确划定、环境及物种资源的保护, 并为区域发展提供决策依据。

在全球气候变化背景下, 过渡区气候、植被、土壤、水文等发生变化, 各要素均存在过渡效应和空间分异特征。有关气候^[2-4]、植被分布^[5-6]、气候—植被参数^[7]、山体效应^[8-9]已开展大量工作, 对北亚热带—暖温带的划界更多依据气候、植被要素而定。竺可桢首次以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温在 $4500\sim 8000^{\circ}\text{C}$ 、最低月均温 $2\sim 16^{\circ}\text{C}$, 无霜期 $240\sim 365\text{ d}$ 作为亚热带划分指标, 其北界接近 34°N , 沿淮河—秦岭—白龙江至 104°E ^[10]; 温暖指数^[11]、 800 mm 等雨量线也被采用作为划界指标; 在植被方面, 以植物类型、区系成分、温带属/热带属比值、山地垂直带谱^[7, 12]来界定; 考虑气候—植被—地形的关系, 秦岭南麓约 $800\sim 1000\text{ m}$ 之间可作为亚热带北界^[7, 13-14]。受自然环境要素空间变化及各区响应幅度差异性的影响, 对南北过渡带的划界结果不同, 采用什么指标更为合适和科学, 已是必须面对的问题^[1]。目前, 秦岭主脊、秦岭分水岭、秦岭南坡、秦岭北坡、大巴山都是学界认可的亚热带与暖温带分界线^[8, 15-16]。

土壤是过渡带的核心部分, 是多种因素经过长期作用综合演化的产物, 土壤性质或属性能够反映各因素的作用及区域地理特征。与气候、水文要素相比, 土壤短期内不易发生变化, 具有较强的稳定性和指示作用, 土壤关键指标的变化和空间分异更能反映多种因素在某一时段的综合作用及过渡效应。在亚区域典型山体样带水平的研究表明, 土壤类型及性质呈现南北渐变的过渡特征^[17-18], 因地形复杂、范围广、调查取样工作量大、指标测试耗时长等因素限制, 整体对秦巴山区土壤性质空间特征开展系统研究及与过渡带界限联系较少。有机碳是土壤中生命物质的载体和骨架, 与各种元素的耦合过程具有同步和协同效应, 全氮含量是仅次于有机碳的生物必需营养元素, 有机碳/全氮是土壤分类划分的依据和主要诊断特性^[19-20], 能够敏感指示成土过程指标变化并反映土壤地带性规律^[21-22]。基于此, 本文选取土壤有机碳、全氮两个指标, 综合考虑地形、植被、气候要素分布特征及与土壤有机碳/全氮的空间关系, 探讨秦巴山区土壤碳氮变化及与中国南北过渡带界限问题, 为明确新的研究方向和聚焦热点区域提供一定科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区分布及空间范围如图1, 跨河南、陕西、甘肃、湖北、重庆、四川6省市, 海拔在 $13\sim 5528\text{ m}$ 之间, 地势西高东低, 地形以山地、盆地、丘陵为主。文中数据来源于《中国土种志(6卷)》、各省土种志和全国土壤普查办公室1995年编制的《1:100万中华人民共和国土壤图》, 综合考虑土壤类型空间分布范围及相邻类型间的差异、山体走向、地形、植被、气候等因素, 采用空间分布相对均匀、相邻土种之间增加样点的原则, 从土种的土壤属性数据库^[23], 提取分辨率约为 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 水平上样点的土壤pH值、有机碳(SOC)、全氮(TN)和不同粒径的颗粒物含量。气温、降水数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>), 涉及区内及周边县级126个气象站点的监测数据, 为与土壤调查数据的时段保持一致, 选择自建站(多在1951—1966年, 个别在1971—1975年)以来至1990年的气温、降水数据进行分析。

2.2 研究方法

利用GS9+筛选有机碳/全氮含量空间模型, 决定系数值越大、残差越小是选择标准, 半变异函数模型均为指数型。在ArcGIS 10.1中, 采用普通克里格模拟有机碳/全氮

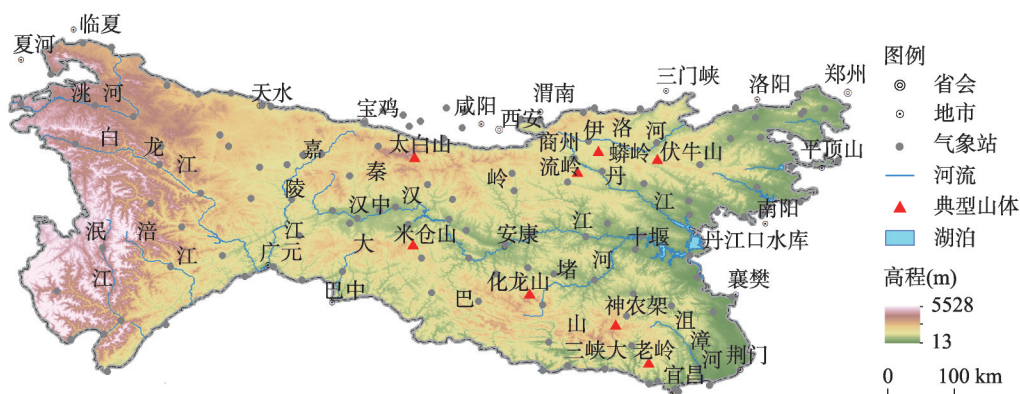


图1 研究区及气象台站分布略图

Fig. 1 Map of the study area and meteorological stations

空间分布, 选取平均误差 (ME)、平均标准误差 (ASE)、均方根误差 (RMSE)、均方误差 (MSE)、均方根标准误差 (RMSSE) 进行拟合精度判断^[24]。以经度、纬度和海拔为独立变量, 利用ANUSPLINE软件的薄盘样条法进行全区气温、降水空间插值^[25-26], 提取各土壤样点的年均温 (MT)、年降水量 (MP)、各季均温 (MT春、MT夏、MT秋、MT冬)、各季降水量 (MP春、MP夏、MP秋、MP冬) 及1月和7月气温; 从地形图提取各样点海拔、坡度; 植被分布和植被垂直带谱的数据来源于《陕西植被》《中国植被》和已发表成果^[8]。

依据地表起伏和有机碳/全氮的空间分布, 筛选出反映土壤碳氮变化的400 m垂直间隔。为区分1000 m附近植被—地形的影响, 特划出800~1000 m等级; 由于> 3000 m土壤调查的样点数少, 归为一类; 最终划分[51, 400 m]、(400, 800 m]、(800, 1000 m]、(1000, 1400 m]、(1400, 1800 m]、(1800, 2200 m]、(2200, 2600 m]、(2600, 3000 m]、(3000, 4906 m]共9个海拔等级, 分析有机碳/全氮与海拔、坡向的关系及其在秦岭—大巴山南北坡的垂向变化规律; 分析/识别典型山体植被带谱的垂向分布及过渡特征, 并以秦岭南坡 (太白山、蟒岭、流岭、伏牛山)、大巴山北坡 (米仓山、化龙山、神农架、三峡大老岭) 和嘉陵江以西的白龙江自然保护区山体为例, 建立暖温带—亚热带过渡区植被带谱与有机碳/全氮含量的空间垂直关系; 从垂直和空间两个角度, 分析气温/降水与有机碳/全氮的关系; 在此基础上, 综合考虑地形—植被—气候—土壤要素的空间过渡特征, 界定秦巴山区过渡带分布范围, 分析区域气候指标特征。

3 结果与分析

3.1 土壤性质基本特征

区内土壤有机碳含量在0.64~71.40 g/kg之间, 均值为21.49 g/kg。全氮含量介于110~7710 mg/kg之间, 均值1918.95 mg/kg。有机碳、全氮呈正偏斜、低峰态型分布。对照国家第二次土壤普查推荐的养分标准, 土壤有机碳、全氮在6个分级标准中均有分布, 说明区内土壤有机碳、全氮空间差异性较大, 且有机碳的含量和空间变化幅度明显高于全氮; 土壤pH值在4.60~8.80之间, 均值6.30, 以酸性土、弱碱性土为主。土壤颗粒以< 2 mm为主, 其中0.002~0.02 mm、< 0.002 mm的含量分别占64.76%、18.70%。

表 1 土壤性质基本统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of soil properties in the study area

指标	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度
有机碳(g/kg)	0.64	71.40	21.49	18.31	1.00	-0.39
全氮(mg/kg)	110. 00	7710.00	1918.95	1408.34	0.80	-0.78
pH	4.60	8.80	6.30	1.25	0.27	-0.99
土壤颗粒						
0.2~2mm	0.00	95.49	18.00	18.26	1.77	4.25
0.02~0.2mm	0.00	74.26	34.13	15.09	-0.44	0.55
0.002~0.02mm	1.20	66.10	30.63	12.42	0.59	0.01
< 0.002mm	3.10	52.22	18.70	6.68	0.48	0.67

3.2 土壤有机碳/全氮空间特征

有机碳在空间上存在 3 个高值区、1 个次高值区和 1 个低值区（图 2）。东西向，在秦岭、大巴山海拔较高的山地为 2 个高值区，有机碳含量在 15.03~51.87 g/kg 之间，南北向上，嘉陵江以西的山地为全区最高，有机碳含量在 15.03~71.04 g/kg 之间。次高值区位于秦岭—大巴山之间的汉江两侧、自西向东呈现南北向宽幅逐渐增大的“喇叭状”变化趋势，有机碳含量在 6.50~15.03 g/kg 之间；低值区沿秦岭北坡，自西向东经陕西渭河谷地、南五台山、华山和河南的伏牛山区，有机碳含量在 0.64~8.48 g/kg 之间。全氮在区内的空间分布、变化趋势与有机碳吻合，高值区、低值区含量分别为 1782.61~7710.00 mg/kg、110.00~885.96 mg/kg，次高值区介于二者之间。土壤有机碳/全氮含量的高值区一次高值区间的渐变趋势不明显，但分区界限清晰。从含量和分布上，汉江两侧及东部的低矮山体、秦岭北坡土壤有机碳/全氮含量低，易受外在因素影响而发生变化。表 2 为拟合模型的精度及参数值。

3.3 地形与土壤有机碳/全氮的关系

地形通过影响植被、气候、生物等要素分布来改变地表生物活动、土壤碳氮过程及含量分布^[27-29]。空间上，有机碳/全氮的次高值区（秦岭北坡除外）主要分布在海拔低于 1000 m 的区域，1000 m 及以上的区域与高值区分布一致（图 3）。在秦岭南坡流岭—鹰咀

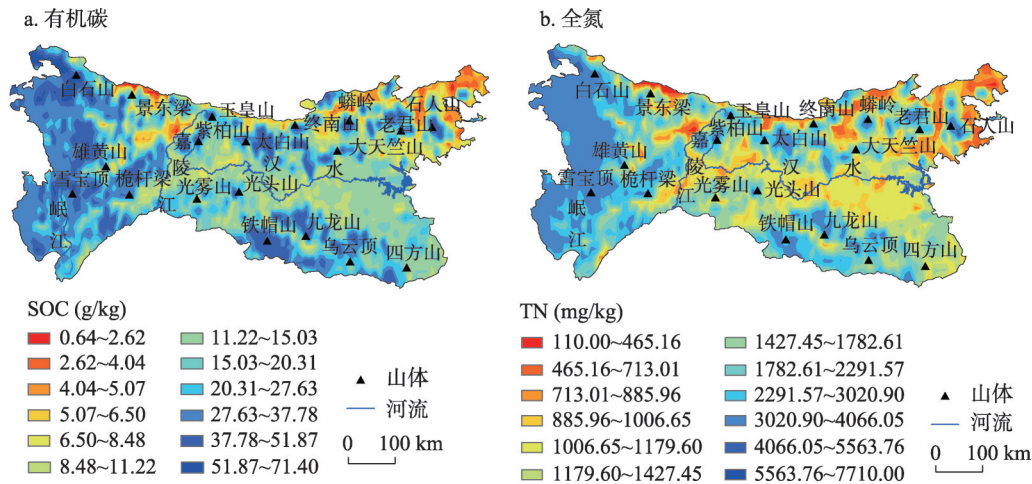


图 2 秦巴山区土壤有机碳/全氮空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of SOC and TN in the Qinling-Daba Mountains

表2 土壤有机碳/全氮空间分布的模拟误差
Tab. 2 Simulation error of SOC and TN spatial distribution

名称	平均误差(ME)	均方根误差(RMSE)	平均标准误差(ASE)	均方误差(MSE)	均方根标准误差(RMSSE)
SOC	0.02	12.84	9.24	0.00	1.40
TN	0.85	963.83	914.89	0.00	1.05

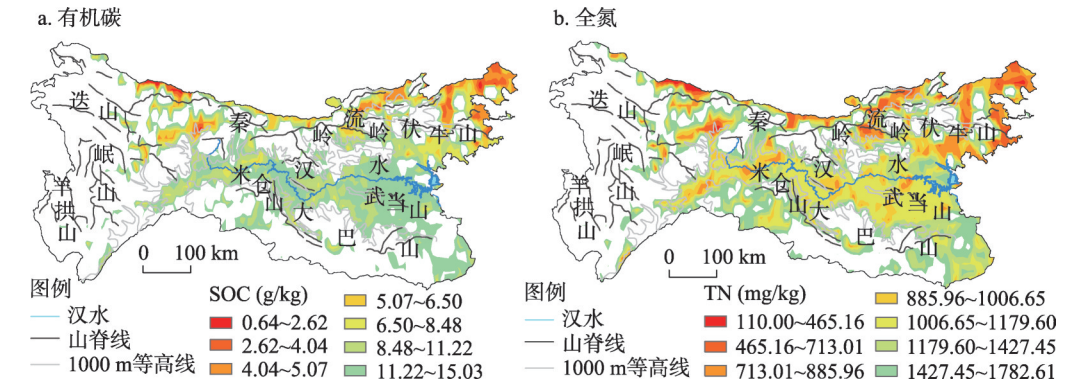


图3 秦巴山区海拔<1000 m的分布区与土壤有机碳/全氮的空间关系
Fig. 3 Spatial relationship between SOC/TN distribution and elevation below 1000 m

石之间，海拔基本都在1000 m以上，低于1000 m的区域分布于山体之间，有机碳/全氮高值区（1000 m及以上）的分布掩盖了< 1000 m的空间特征，使该区碳氮次高值区分布与1000 m等高线不一致；秦岭南坡中段偏西—汉中盆地北部略高于1000 m的山区，也是有机碳/全氮次高值分布区。伏牛山区，南坡有机碳/全氮的含量高于北坡，次高值区大体在南坡< 1000 m区域及北坡靠近山脊线的部分区域。秦岭北坡为低山、河谷平原区，有机碳/全氮含量偏低。

垂向上，有机碳/全氮的变化趋势如图4。全区，随海拔升高有机碳/全氮含量呈先缓慢增加、后快速升高的变化趋势，800~1000 m的高度可作为衡量碳氮含量和增幅变化的分界点，1000~3000 m的有机碳/全氮含量和增幅（分别为3.19~8.65 g/kg、258.09~651.75 mg/kg）明显高于< 1000 m区域（分别为2.17~2.37 g/kg、112.41~156.71 mg/kg）；嘉陵江以西> 3000 m的山地，有机碳含量/变幅降低、全氮变幅降低。仅考虑嘉陵江以东的秦岭南坡—大巴山北坡区域，有机碳/全氮的垂向变化趋势与全区一致，其含量、增幅均在800~1000 m出现拐点，在2200~2600 m接近山脊的区域呈降低趋势。相关分析显示，≤ 800 m和> 3000 m区域，坡度与有机碳/全氮含量呈显著性相关；800~3000 m之间，坡度与有机碳/全氮含量呈弱相关，表明坡度、海拔在≤ 1000 m和> 3000 m区域是有机碳/全氮变化的重要影响因素，而海拔是1000~3000 m土壤变化的主控因素。

南北向上，有机碳/全氮含量与海拔关系如图5，从北向南，大致以山脊为界，有机碳/全氮均值和最小值呈“双峰型”变化趋势。相同海拔高度，秦岭南坡的碳氮含量高于北坡；大巴山1400 m及以下区域，同高度内的南坡土壤碳氮含量高于北坡，而>1400 m的区域，同高度内的北坡碳氮含量高于南坡；秦岭南坡800~1000 m至大巴山北坡1000~1400 m，土壤碳氮变化平稳，含量分别为9.93~15.66 g/kg、1019.00~1386.00 mg/kg。对比发现，秦岭南坡—大巴山北坡> 1000 m的区域有机碳/全氮较≤ 1000 m的区域含量高、增幅大，这是1000 m出现拐点的原因。嘉陵江以西，≤ 500 m和500~2200 m区域，有机碳/全氮含量分别为15.29~20.75 g/kg、1356.79~1864.32 mg/kg，随海拔升高呈缓慢升

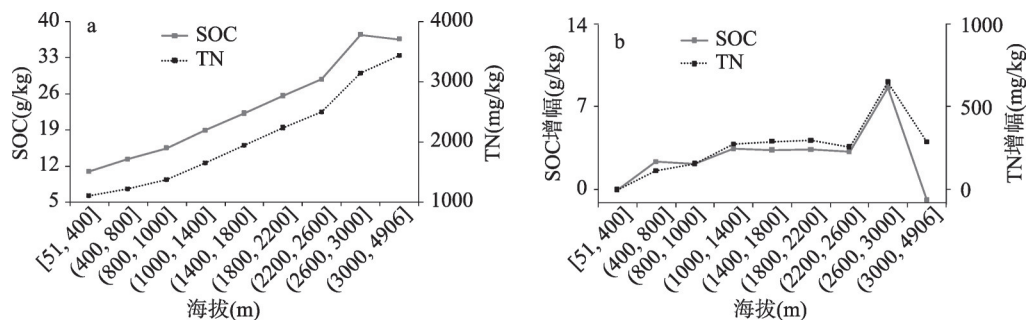


图4 秦巴山区土壤有机碳/全氮含量和增幅与海拔关系

Fig. 4 Content and increasing range of SOC/TN and their relationships with altitude

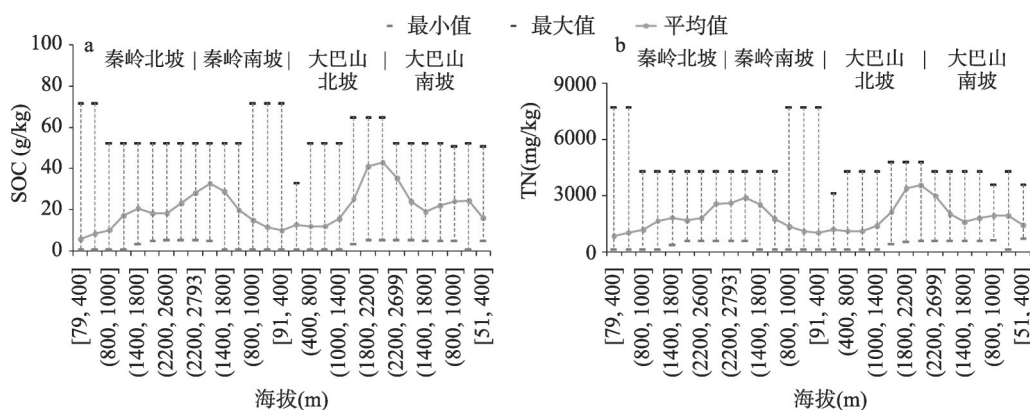


图5 秦巴山区南北向土壤有机碳/全氮含量变化及与海拔关系

Fig. 5 Altitudinal variance in SOC/TN from north to south in the Qinling-Daba Mountains

高趋势, >2600 m 碳、氮含量分别为 36.64~37.80 g/kg、3158.82~3433.42 mg/kg, 变化趋势与全区一致 (图4)。

从空间、垂直和南北向上, 有机碳/全氮含量及增幅均在秦岭南坡—大巴山北坡 800~1000 m 出现拐点。海拔与土壤有机碳/全氮的关系实质上是地形引起了各自然地理要素的空间/垂向变化, 各要素的综合效应及动态过程是驱动土壤碳氮变化的最根本原因。

3.4 植被与土壤有机碳/全氮的关系

自然生态系统中, 地表植被类型及其凋落物归还还是土壤有机物的主要来源及有机碳/全氮含量的关键影响因素, 植被类型分布或植被带谱空间格局能够反映区内植物的过渡效应及与土壤类型、性质的空间关系。现有研究表明, 大巴山南坡及其东部基面高度以上出现亚热带常绿阔叶林带^[30-33], 秦岭北坡东西向山地基带以上以温带、暖温带植物类型为主^[34-35]; 白水江自然保护区基面以上 (600~950 m) 为亚热带常绿阔叶混交林, 自此向西的高大山体, 植被带谱的过渡特征不明显。秦岭南坡东西向山地基面以上出现了暖温带落叶阔叶林带 (含常绿成分)^[35-36]、大巴山北坡基带以上为亚热带常绿落叶阔叶混交林带^[31-32, 37], 植被类型及垂直带谱兼具了暖温带—亚热带的特征, 呈现南北过渡特点。

从过渡区典型山体垂直带谱的高度、带宽上 (图6), 秦岭南坡暖温带落叶阔叶林 (含常绿成分) 分布范围为, 太白山南坡在 500~1000 m、伏牛山南坡在 600~1100 m、流岭—莽岭在 200~1300 m; 大巴山北坡亚热带常绿落叶阔叶混交林带分布范围为, 米仓山北坡在 500~1200 m、化龙山在 215~900 m、神农架北坡在 600~1100 m^[32]; 其中太白山南

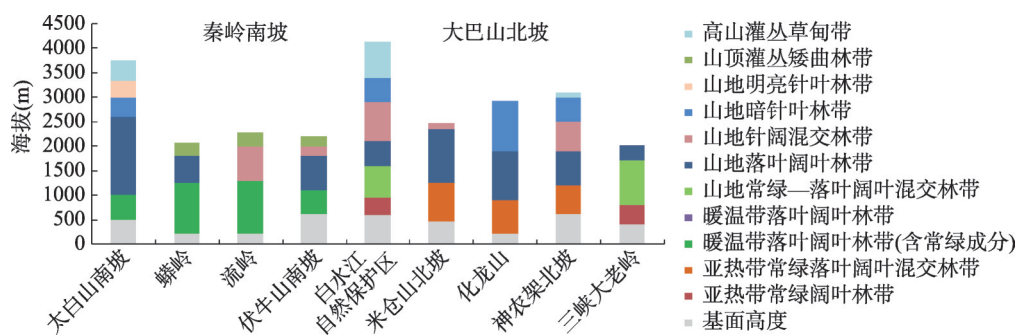


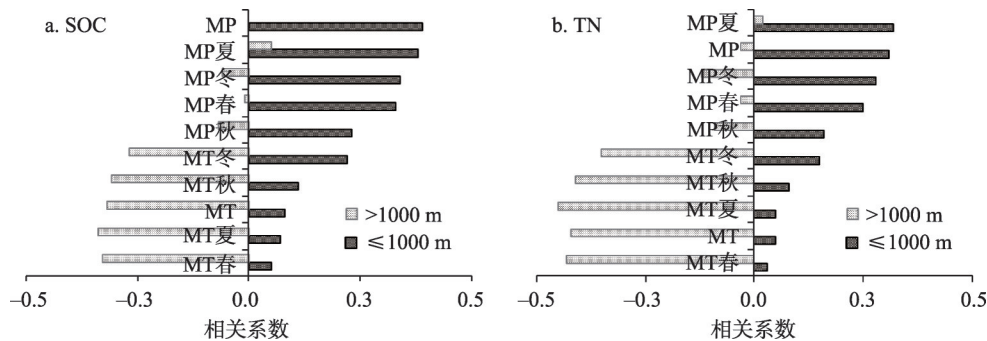
图6 秦岭南坡—大巴山北坡典型山体垂直带谱分布

Fig. 6 Mountain altitudinal belts on the southern slope of the Qinling Mountains and the northern slopes of the Daba Mountains

坡、伏牛山南坡、米仓山北坡、化龙山北坡、神农架北坡，暖温带落叶阔叶林带（含常绿成分）和亚热带常绿落叶阔叶混交林带的上限大体与有机碳/全氮的次高值区上限、1000 m等高线吻合；而流岭—莽岭 200~1300 m 植被带谱的带宽增加，即下限下移、上限上移，有机碳/全氮的次高值区与 1000 m 等高线、暖温带落叶阔叶林带（含常绿成分）呈错位分布，植被带谱上限分布偏北（上）、有机碳/全氮偏南。在典型山体中，秦岭南坡 800~1000 m 有机碳/全氮的平均含量分别为 7.44~10.17 g/kg、688.80~984.54 mg/kg，自西向东，有机碳/全氮含量呈降低趋势；大巴山北坡 800~1000 m 有机碳/全氮分别为 10.94~13.15 g/kg、1038.89~1227.78 mg/kg，自西向东，有机碳/全氮含量呈升高趋势。南北向上，800~1000 m 有机碳/全氮含量呈现米仓山>太白山、化龙山>流岭（蟒岭）、神农架>伏牛山的趋势。除伏牛山全氮含量略低于次高值区外，其他各山体有机碳/全氮含量均处于次高值区的范围。综上，在汉江两侧，太白山南坡—大巴山北坡之间夹持的海拔 < 1000 m、伏牛山区 < 1000 m 及流岭—莽岭略高于 1000 m 的区域是亚热带—暖温带植被过渡带谱分布区，其与有机碳/全氮含量次高值区的分布基本吻合。

3.5 气候与土壤有机碳/全氮关系及过渡区气候特征

3.5.1 气温/降水与有机碳/全氮的关系 气候是影响植被类型分布格局和土壤类型/性质变化的重要因素，在地形、植被与有机碳/全氮空间和垂向关系的分析基础上，进一步探讨气候要素分布特征及对碳氮的影响。分析发现（图 7），海拔 ≤ 1000 m，全年、4 个季节



注：P < 0.01。

图7 秦巴山区不同海拔土壤有机碳/总氮与气温/降水的相关特征

Fig. 7 Correlation between SOC/TN and MP/MT at different elevations

降水对有机碳/全氮的作用强于气温,且气温、降水与有机碳/全氮均呈显著正相关,相关系数分别为0.05~0.39、0.03~0.32,夏、冬和春季降水量的作用强于秋季;海拔>1000 m,气温对碳氮作用强于降水,气温、降水(除MP夏)与碳氮呈显著负相关,相关系数分别为-0.01~-0.34、-0.03~-0.45,春、夏和秋季气温的作用强于冬季;全氮与气温/降水的关系和有机碳基本一致。4个季节中,降水和气温通过影响地表植物生长、凋落物归还和土壤生物活动来影响土壤碳氮过程。 ≤ 1000 m的降水、气温与有机碳/全氮正相关,春季、夏季是植物和土壤生物生命活跃期,降水量增加有利于植物生长,促进地表生物量累积及有机物归还量,提高了土壤碳氮含量;而冬季气温低、降水少、生物分解作用弱,有助于凋落物的腐解和积累;秋季,降水对土壤碳氮的提升作用降低,这与植物生长速度变缓和生物分解作用活跃有关。有机碳/全氮与>1000 m降水(除MP夏)、气温负相关,且温度的作用强度大于降水,说明海拔升高,气温降低,低温不利于生物生长,同时弱化了降水的作用,减缓了有机物的分解转化过程,促进有机物累积和碳氮含量提升。

从全年及4个季节气温、降水的空间分布上看,年均温在秦巴山地夹持的区域、大巴山南部及东部伏牛山区为高值区,嘉陵江以西及秦岭主脊为低值区(图8),春、夏和秋季均温与年均温的空间分布趋势较为一致,冬季气温的高值区南移、低温区整体南扩;年降水量与年均温分布不同,年降水量在大巴山区最高(987~1332 mm),秦岭西段最低(398~596 mm),二者夹持的区域在596~987 mm之间。4个季节中,春、秋季降水量与年降水量的空间分布趋势一致,冬季降水量整体南移、呈西南—东北向的分布,夏季降水量较春、秋和冬季高。分析发现,有机碳/全氮含量的次高值区是4个季节气温/降水南北向波动幅度较大的区域。通常,植物的光合作用、生长发育起点温度在5~10℃,热带植物生长最低温略高于温带。冬季,全区气温低于9.42℃,植物发育缓慢或停止生长;在秦巴山地之间的低山、河谷区,春、夏和秋季气温在10.09~29.69℃,满足了温带、亚热带植物的生长需求。综合来看,秦巴山区之间及东部伏牛山区是气温/降水季节性变化的敏感区和交汇区,是过渡带植被和有机碳/全氮次高值区分布的重要影响因素。

基于以上分析,考虑山脊线、植被带谱、土壤有机碳/全氮次高值区、1000 m等高线、气温/降水各因素作用和分布,提取秦岭南坡一大巴山北坡1月0℃等温线、7月24℃等温线、800 mm等雨量线与1000 m等高线(图8a~8d),发现1月0℃等温线、7月24℃等温线与1000 m等高线基本一致,该区也是土壤有机碳/全氮次高值区的主要分布区(图8e),自西向东,北界沿都江堰—茂县—平武—文县—康县—徽县—佛坪—宁陕—镇安—山阳—商南—栾川—卢氏—洛南—一线分布,南界沿都江堰—北川—青川—宁强—镇巴—岚皋—竹溪—神农架林区分布,在伏牛山和嘉陵江以西,1月0℃等温线与1000 m等高线、7月24℃等温线略有偏差,其它各区分布趋势较一致,说明秦岭南坡和大巴山北坡1000 m高度是土壤、植被、气候变化的重要分界线,二者夹持的范围是亚热带向暖温带过渡的主体分布区。

3.5.2 过渡区气候特征 秦岭南坡、大巴山北坡和嘉陵江以西海拔在1000 m及以下的区域(表3),1月气温-4~5℃,均值在1~2℃,年降雨量在678~1578 mm。各区1月气温、7月气温、年均温及各季气温的最低值、最高值和平均值接近,年内变化趋势一致,年降雨量均大于800 mm,且集中在春、夏、秋季。从各指标来看,过渡区内降雨在各季的变幅大,而气温在年内的变化较稳定,相比而言,气温的变化较降水更能敏感、准确地反映过渡带的变化。

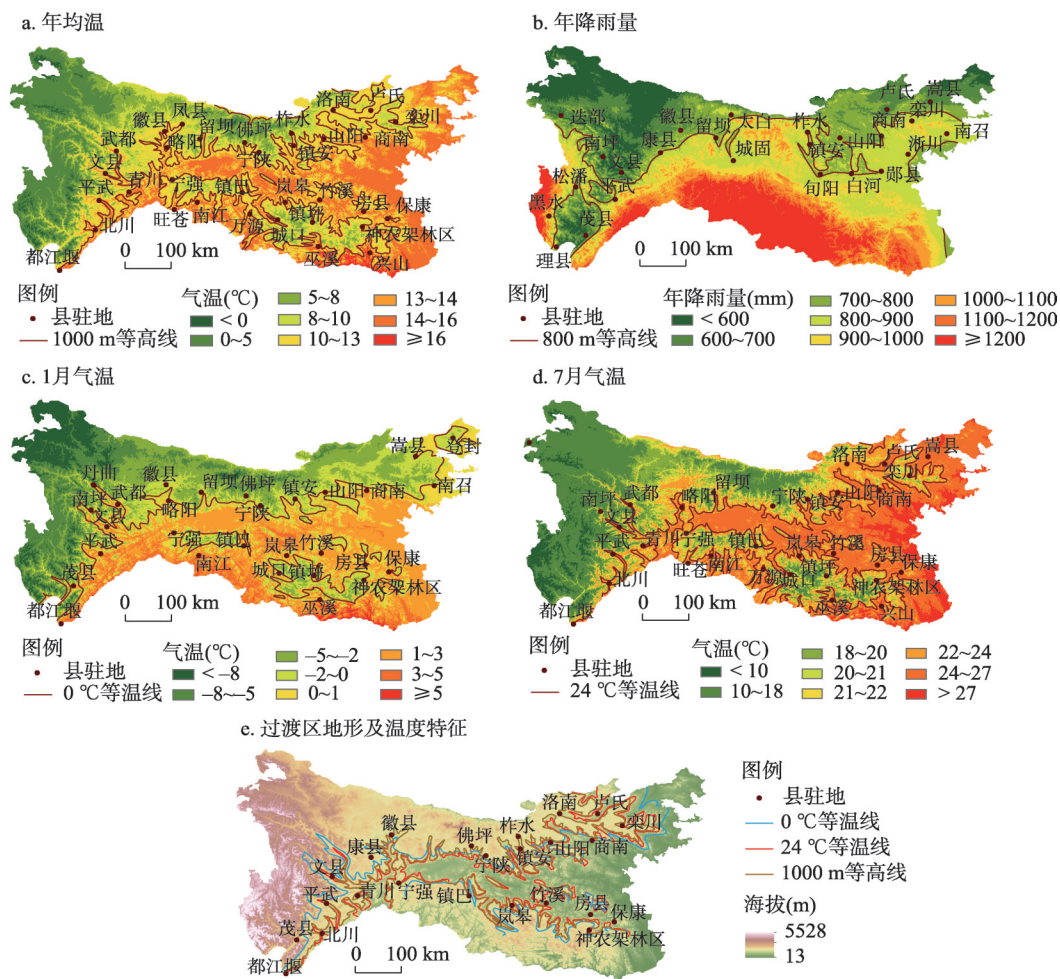


图8 秦巴山区气温/降水的空间分布与过渡带主体区

Fig. 8 Spatial distribution of temperature and precipitation and the main region of the transitional zone in the Qinling-Daba Mountains

4 结论与讨论

4.1 讨论

有机碳/全氮分布与地形、植被、气候要素的空间关系能较好地反映区域特征和过渡效应。土壤有机碳与全氮的空间分布趋势较为一致，二者空间相关性为0.97。从气候、植被、土壤空间变化上，土壤有机碳/全氮的次高值区分布与亚热带—暖温带植被带谱过渡区分布吻合，大致以秦岭南坡—大巴山北坡1000 m等高线为界，其北界与马建华^[13]、张学忠^[5]、康慕谊^[7]、姚永慧^[38]等的结果相一致。该区1月均温为1~2 °C、7月均温23~25 °C，年降雨量678~1578 mm（秦岭南坡<1000 m、大巴山北坡<1000 m）、年内4个季节气温/降水均值接近或相等，气候指标具有过渡带特征^[8, 39]，表明土壤有机碳/全氮的空间特征及次高值区分布范围可作为亚热带—暖温带的划界依据。1000 m等高线可为中

表3 秦巴山区过渡区气候指标特征

Tab. 3 Climate indices for the transitional area between the southern slope of the Qinling Mountains and the northern slope of the Daba Mountains

气候指标	秦岭南坡	大巴山北坡	嘉陵江以西
1月气温(°C)	-4~-4(1)	-2~-4(2)	-3~-5(2)
7月气温(°C)	16~28(25)	18~28(25)	18~25(23)
MT(°C)	7~16(13)	8~16(14)	9~16(13)
MP(mm)	678~1152(834)	739~1494(936)	560~1578(1022)
MP春(mm)	142~239(180)	151~317(221)	120~208(168)
MP夏(mm)	316~562(402)	315~697(417)	312~962(575)
MP秋(mm)	169~370(231)	203~416(268)	140~327(240)
MP冬(mm)	5~33(19)	9~42(24)	6~45(16)
MT春(°C)	8~16(13)	8~16(14)	10~16(14)
MT夏(°C)	15~27(24)	16~27(24)	17~25(22)
MT秋(°C)	8~16(14)	8~17(14)	9~16(13)
MT冬(°C)	-3~-5(2)	-1~-6(3)	-1~-6(3)

注：括号内为均值,括号外为最小值和最大值。

国南北过渡带划界提供可靠依据,但不同区域存在差异,在秦岭中段(太白—米仓山)与1000 m等高线较吻合,自中段向秦岭东段的伏牛山区,变化趋于复杂,多因素的综合效应渐强,垂直高度/南北向幅度也复杂,过渡带北界与1000 m等高线分布略有不同。

气候变化背景下,气温升高、降水量增减影响植被类型分布、有机物归趋及土壤性质动态变化,植被、土壤的变化幅度滞后于气温、降水,但南北向气温/降水量变化大、过渡效应明显的区域,往往是植被、动物、水文、土壤等因素处于重组中,具有敏感、易变、不稳定等特征。从响应强度上,土壤性质、植被类型较气温、降水具有强的稳定性,更能反映过渡区的过渡效应。另外,气候变化背景下气温、降水的波动及其空间格局造成的假象,不能全面反映北亚热带—暖温带的真实特征和边缘效应,需考虑土壤—植被—气候—地形因素的综合作用及其互作机制,迫切需要开展土壤剖面指标变化及成土过程研究。

土壤有机碳/全氮含量的次高值分布区,一方面受海拔、地形、植被、气候等自然因素的影响,另一方面,该区人口高度集中分布,农业耕作、居民生活等人为因素作用强度大。从同期土地利用类型和典型山体植被带谱图来看,区内农业用地与土壤碳氮次高值区的分布并不吻合,农业用地主要分布在基带的地势平缓区及汉江两侧盆地区^[40-41], > 1000 m山地的缓坡也有分布,各区分布面积和高度不同,识别不同区域人为和自然因素的影响强度也是准确评价过渡带分界及过渡效应的重要因素。

4.2 结论

秦巴山区土壤有机碳/全氮含量在空间上分布趋势一致,存在3个高值区、1个次高值区和1个低值区,高值区分布在秦岭、大巴山的高海拔和嘉陵江以西的山地,含量分别为15.03~71.04 g/kg、1782.61~7710.00 mg/kg;低值区沿秦岭北坡的渭河谷地、南五台山、华山和伏牛山分布,含量分别为0.64~6.50 g/kg、110.00~885.96 mg/kg;次高值区主要在汉江两侧、秦巴山地之间夹持的海拔< 1000 m、伏牛山< 1000 m及嘉陵江两侧略高于1000 m的山体,含量介于以上二者之间,自西向东呈现南北向宽幅逐渐增大的“喇叭状”变化趋势。高值区、次高值区和低值区之间的渐变趋势不明显,但分区界限清晰。

综合考虑地形—植被—气候的空间特征及作用,发现土壤有机碳/全氮含量次高值区的分布范围与1000 m等高线、暖温带落叶阔叶林带(含常绿成分)和亚热带常绿落叶阔叶混交林带分布上限基本一致。该区是亚热带向暖温带过渡的主体区,分布在汉江两侧,自西向东,北界沿都江堰—茂县—平武—文县—康县—徽县—佛坪—宁陕—镇安—山阳—商南—栾川—卢氏—洛南—一线分布,南界沿都江堰—北川—青川—宁强—镇巴—岚皋—竹溪—神农架林区分布。区内气温/降水的季节性变化、1月气温、7月气温和年降雨量均可反映过渡区的气候特征。研究表明,土壤有机碳/全氮的含量变化及次高值区分布可为北亚热带—暖温带的划界提供依据。

土壤有机碳/全氮的空间特征能够反映土壤与地形、植被、气候要素的空间关系及过渡区分布,但不能全面揭示不同区域、不同山体关键的生态学过程和垂向变异机理。进一步加密采样地点,选取典型区、典型山体和敏感区开展有机碳/全氮组分特征、土壤生物过程及多因素影响下的剖面发育过程及动态特征,可识别秦巴山区土壤与环境因素之间的关系及多维度变化特征。

参考文献(References)

- [1] Zhang Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone. *Progress in Geography*, 2019, 38(3): 305-311. [张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 305-311.]
- [2] Zhou Qi, Bian Juanjuan, Zheng Jingyun. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1211-1218. [周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北1951—2009年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.]
- [3] Zheng Du, Yang Qinye, Wu Shaohong, et al. *Study on Ecogeographic Regional System of China*. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度, 杨勤业, 吴绍洪, 等. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [4] Li Shuangshuang, Lu Jiayu, Yan Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13-24. [李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24.]
- [5] Zhang Xuezhong, Zhang Zhiying. A preliminary discussion on the northern boundary of subtropical zone in China: Based on the distribution of broadleaf woody evergreens on the Qinling Mountain. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(4): 342-352. [张学忠, 张志英. 从秦岭南北坡常绿阔叶木本植物的分布谈划分亚热带的北界线问题. *地理学报*, 1979, 34(4): 342-352.]
- [6] Wang Jinglan, Liu Quanru, Meng Shiyong, et al. Division of the geo-ecological boundary in Qinling Mountain Range based on the composition and geographical elements of its Pteridophyta flora. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1629-1638. [王菁兰, 刘全儒, 孟世勇, 等. 从秦岭蕨类植物区系地理成分论秦岭山地生态分界线的划分. *地理研究*, 2010, 29(9): 1629-1638.]
- [7] Kang Muyi, Zhu Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling Range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774-2784. [康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784.]
- [8] Zhao Fang, Zhang Baiping, Zhu Lianqi, et al. Spectra structures of altitudinal belts and their significance for determining the boundary between warm temperate and subtropical zones in the Qinling-Daba Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 889-901. [赵芳, 张百平, 朱连奇, 等. 秦巴山地垂直带谱结构的空分异与暖温带—亚热带界线问题. *地理学报*, 2019, 74(5): 889-901.]
- [9] Zhao Ting, Bai Hongying, Deng Chenhui, et al. Topographic differentiation effect on vegetation cover in the Qinling Mountains from 2000 to 2016. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4499-4509. [赵婷, 白红英, 邓晨晖, 等. 2000—2016年秦岭山地植被覆盖变化地形分异效应. *生态学报*, 2019, 39(12): 4499-4509.]
- [10] Zhu Kezhen. Subtropics of China. *Chinese Science Bulletin*, 1958, 9(17): 524-528. [竺可桢. 中国的亚热带. *科学通报*, 1958, 9(17): 524-528.]
- [11] Fang Jingyun. Eco-climatic analysis of forest zones in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, 11(4): 377-387. [方精云. 我国森林植被带的生态气候学分析. *生态学报*, 1991, 11(4): 377-387.]
- [12] Ying Junsheng, Li Yunfeng, Guo Lefeng, et al. Observations on the flora and vegetation of Taibaishan, Qinling

- Mountain range, southern Shannxi, China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1990, 28(4): 261-293. [应俊生, 李云峰, 郭勒峰, 等. 秦岭太白山地区的植物区系和植被. *植物分类学报*, 1990, 28(4): 261-293.]
- [13] Ma Jianhua. Laws of soil vertical variations on southern slope of Funiu Mt.: Simultaneous study on north boundary of subtropical zone. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 998-1011. [马建华. 试论伏牛山南坡土壤垂直分异规律: 兼论亚热带北界的划分. *地理学报*, 2004, 59(6): 998-1011.]
- [14] Zhang Jinqun. Division between subtropical zone and temperate zone in Henan Province according to geo-botany. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 36(2): 216-222. [张金泉. 从地植物学角度试论河南省境内亚热带与暖温带的分界线问题. *地理学报*, 1981, 36(2): 216-222.]
- [15] Ren Mei'e, Yang Renzhang. China's natural division. *Acta Geographica Sinica*, 1961, 27(12): 66-74. [任美铎, 杨纫章. 中国自然区划问题. *地理学报*, 1961, 27(12): 66-74.]
- [16] Liu Yinhan. On natural zonation in the Shaanxi Province. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(3): 210-218. [刘胤汉. 关于陕西省自然地带的划分. *地理学报*, 1980, 35(3): 210-218.]
- [17] Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. *Chinese Forest Soil*. Beijing: Science Press, 1986. [中国林业科学研究院林业研究所. *中国森林土壤*. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [18] Lei Mei, Chang Qingrui, Feng Lixiao, et al. Soil characteristic and genetic feature of iron oxide of Taibai Mountains. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 83-90. [雷梅, 常庆瑞, 冯立孝, 等. 太白山土壤特性及氧化铁发生学特征. *地理研究*, 2001, 20(1): 83-90.]
- [19] Li Decheng, Zhang Ganlin. On difficulties and countermeasures in describing soil series in Chinese soil taxonomy. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1563-1567. [李德成, 张甘霖. 中国土壤系统分类土系描述的难点与对策. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1563-1567.]
- [20] Catoni M, D'Amico M E, Zanini E, et al. Effect of pedogenic processes and formation factors on organic matter stabilization in alpine forest soils. *Geoderma*, 2016, 263: 151-160.
- [21] Kögel-Knabner I, Amelung W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups. *Geoderma*, 2021, 384: 114785. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114785.
- [22] Ma Jianhua, Han Jinxian, Zhao Qingliang. The division between subtropical zone and warm temperate zone according to the compositions and properties of soil humus. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(3): 272-276. [马建华, 韩晋仙, 赵庆良. 试从土壤腐殖质组成和性质论伏牛山南侧亚热带北界的划分. *山地学报*, 2002, 20(3): 272-276.]
- [23] Zhang Dingxiang, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. The basis for establishing China's 1:1000000 soil database. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(Suppl.): 82-86. [张定祥, 史学正, 于东升, 等. 中国 1:100 万土壤数据库建设的基础. *地理学报*, 2002, 57(Suppl.): 82-86.]
- [24] Zhang Junhua, Li Guodong, Wang Yansong, et al. Spatial characteristics and variation mechanism of different soil organic carbon components in the alluvial/sedimentary zone of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 558-570. [张俊华, 李国栋, 王岩松, 等. 黄河泥沙冲/沉积区土壤有机碳不同组分空间特征及变异机制. *地理学报*, 2020, 75(3): 558-570.]
- [25] Ünver İ, Madenoğlu S, Dilsiz A, et al. Influence of rainfall and temperature on DTPA extractable nickel content of serpentine soils in Turkey. *Geoderma*, 2013, 202/203: 203-211.
- [26] Guo B, Zhang J, Meng X, et al. Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 81. DOI: 10.1038/s41598-019-57078-3.
- [27] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [28] Long J, Liu Y, Xing S, et al. Optimal interpolation methods for farmland soil organic matter in various landforms of a complex topography. *Ecological Indicators*, 2020, 110: 105926. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105926.
- [29] Zhu M, Feng Q, Qin Y Y, et al. The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon. *CATENA*, 2019, 176: 296-305.
- [30] Gao Guanmin. The natural vertical zone of Shennongjia Mountain. *Journal of Mountain Research*, 1986, 4(4): 282-286. [高冠民. 神农架山地垂直自然带. *山地研究*, 1986, 4(4): 282-286.]
- [31] Ying Junsheng, Ma Chenggong, Zhang Zhisong. Observations of the flora and vegetation of Mt. Shennongjia in western Hubei, China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1979, 17(3): 41-60. [应俊生, 马成功, 张志松. 鄂西神农架地区的植被和植物区系. *植物分类学报*, 1979, 17(3): 41-60.]
- [32] Ma Mingzhe, Shen Guozhen, Xiong Gaoming, et al. Characteristic and representativeness of the vertical vegetation zonation along the altitudinal gradient in Shennongjia Natural Heritage. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(11):

- 1127-1139. [马明哲, 申国珍, 熊高明, 等. 神农架自然遗产地植被垂直带谱的特点和代表性. 植物生态学报, 2017, 41(11): 1127-1139.]
- [33] Xue Zhilong, Wang Junming. Vegetation distribution pattern in Micang Nature Reserve located in the west part of Bashan Mountains. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2010, 38(6): 27-31, 41. [薛智龙, 王俊明. 大巴山西段陕西米仓山自然保护区的植被及分布. 陕西林业科技, 2010, 38(6): 27-31, 41.]
- [34] Zhang Yanjun, Yu Yaochuang, Niu Junjie, et al. The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 629-639. [张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局. 生态学报, 2020, 40(2): 629-639.]
- [35] Ye Yongzhong, Yang Qingpei, Weng Mei, et al. Studies on forest community diversity in Funiu Mountain I: Vertical distribution of community and species richness. *Henan Science*, 1999, 17(Suppl.1): 61-64. [叶永忠, 杨清培, 翁梅, 等. 伏牛山森林群落物种多样性研究I. 群落垂直分布与物种丰富度. 河南科学, 1999, 17(Suppl.1): 61-64.]
- [36] Fang Zheng, Gao Shuzhen. Vegetation vertical belt on the north and south slopes of Taibai mountain in Qinling Mountains. *Journal of Plant Ecology and Geobotany*, 1963, 1(Suppl.1): 162-163. [方正, 高淑贞. 秦岭太白山南北坡的植被垂直带谱. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(Suppl.1): 162-163.]
- [37] Huang Ke. Vegetation vertical zone on the north slope of Daba Mountain. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 1979, 7(1): 151-154. [黄可. 大巴山北坡植被垂直地带谱. 陕西师范大学学报(自然科学版), 1979, 7(1): 151-154.]
- [38] Yao Yonghui, Kou Zhixiang, Hu Yufan, et al. Spatial distribution patterns of *Pinus tabulaeformis* forest and *Pinus massoniana* forest in Qinling- Daba Mountains and the boundary of subtropical and warm temperate zones. *Acta Geographica sinica*, 2020, 75(11): 2298-2306. [姚永慧, 寇志翔, 胡宇凡, 等. 秦巴山区马尾松林和油松林的空间分布及亚热带与暖温带界线划分. 地理学报, 2020, 75(11): 2298-2306.]
- [39] Fang Jingyun. Re-discussion about the forest vegetation zonation in eastern China. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(5): 522-533. [方精云. 也论我国东部植被带的划分. 植物学报, 2001, 43(5): 522-533.]
- [40] Liu Yansui. Structural analysis and optimal use of land types in mountainous regions: Taking Qinling Mountains of Shaanxi Province as an example. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 426-436. [刘彦随. 山地土地类型的结构分析与优化利用: 以陕西秦岭山地为例. 地理学报, 2001, 56(4): 426-436.]
- [41] Shen Zehao, Zhang Quanfa, Yue Chao, et al. The spatial pattern of land use/land cover in the water supplying area of the middle-route of the South-to-North Water Diversion (MR-SNWD) Project. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6): 633-644. [沈泽昊, 张全发, 岳超, 等. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局. 地理学报, 2006, 61(6): 633-644.]

Spatial patterns of SOC/TN content and their significance for identifying the boundary between warm temperate and subtropical zones in China's north-south transitional zone

ZHANG Junhua^{1,2}, ZHU Lianqi^{1,2}, LI Guodong^{1,2}, ZHAO Fang^{1,2}, QIN Jingting^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Kaifeng 475004, Henan, China; 2. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

Abstract: The Qinling-Daba Mountains form the main body of China's north-south transitional zone. However, because there is a controversy about the specific location of the geographical boundary in academic community, it is important to determine and improve the existing classification indices to construct the ecological geographical pattern in China. Soil is the core section of the transitional zone, the spatial distribution and variations in key soil indexes in the Qinling- Daba Mountains are important indicators for identifying the transition effect and

regional characteristics of China's north-south transitional zone. This paper analyzes the spatial characteristics of soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN), and their relationships with major geographical factors by means of spatial analysis and geostatistics, using data from the second national soil survey, as well as terrain, climate and vegetation data. Results show that spatial trends of SOC and TN contents are similar, and that there are three areas with high contents, one secondary area with high content and one area with low content. The high contents are found in the high-altitude regions of the Qinling-Daba Mountains and in the mountainous areas to the west of the Jialing River. Here, SOC and TN contents range from 15.03-71.04 g/kg and 1782.61-7710.00 mg/kg, respectively. The low-content areas spread from west to east across the Weihe Valley, to the southern Wutai and Funiu mountains, and along the north slope of the Qinling Mountains. Here, SOC and TN contents range from 0.64-6.50 g/kg and 110.00-885.96 mg/kg, respectively. The secondary high-content area is mainly located on the both sides of the Hanjiang River, in the Qinling-Daba Mountains where altitudes are less than 1000 m, in the Funiu Mountains at altitudes less than 1000 m and on both sides of Jialing River at altitudes slightly higher than 1000 m. Here, SOC and TN contents are between the above two ranges, with a gradual increase in content forming a "horn-shaped" pattern from west to east. In terms of the spatial characteristics and functions of vegetation, topography and climatic factors, it is found that the SOC/TN range in the secondary high-content area is consistent along the 1000 m contour line, at the upper limit of the warm temperate deciduous broadleaved forest belt (containing evergreen forest) and of the subtropical/warm temperate mixed evergreen-deciduous broadleaved forest belts, as well as along the 0 °C isotherm line in January and the 24 °C isotherm line in July. The temperature changes are stable in January, July, annually and during the four seasons, but the rainfall varies greatly in each season. This region is the main body area of the transtional zone between subtropical zone and warm temperate zone: the northern boundary is roughly distributed along the line of Dujiangyan-Maoxian-Pingwu-Wenxian to the west of the Jialing River and the 1000 m contour line on the southern slope of the Qinling Mountains. The southern boundary lies along the line of Dujiangyan-Beichuan-Qingchuan to the west of the Jialing River and the 1000 m contour line of the northern slope of the Daba Mountains. The results show that the spatial variation of SOC/TN content provides a reference for the demarcation of the subtropical-warm temperate zone. A further understanding of the soil processes and ecological effects in typical regions and typical mountains will help reveal the multi-dimensional transition characteristics and variation mechanism in the region.

Keywords: China's north-south transitional zone; SOC; TN; terrains; vegetation; climatic boundary