

# 深圳大鹏半岛国家地质公园土壤理化性质分析与生态评价\*

张豪华 叶强 鲍子禹 陈子銮  
羊海军 李薇 俞新华  
(华南农业大学, 广东广州 510642)

**摘要** 为了解深圳大鹏半岛国家地质公园林地土壤的现实肥力水平和生产潜力, 利用实验分析与数据统计整理的方法, 分析了该园区土壤的基本理化性质与土壤生态评价。结果表明: 1) 研究区域土壤主要以少砾质与中砾质壤土为主, 占园区65%以上; 2) 土壤容重 $1.10\sim 1.35\text{ g/cm}^3$ , 自然含水量 $59.49\sim 402.15\text{ g/kg}$ , 毛管持水量 $102.00\sim 859.95\text{ g/kg}$ , pH值 $4.01\sim 5.27$ , 有机质含量 $0.32\sim 45.85\text{ g/kg}$ , 全氮含量 $0.02\sim 7.74\text{ g/kg}$ , 速效磷含量 $0.01\sim 8.29\text{ mg/kg}$ , 碳氮比 $1.63\sim 53.61$ ; 3) 按照不同土壤深度划分, 研究区域土壤理化性质呈现不同程度的规律性, 毛管持水量呈自上而下递减规律; 土壤容重与毛管持水量呈相反规律呈自上而下依次递增; 有机质、全氮、速效磷含量特征是随着土层深度的增加而逐层下降; 4) 单因子指数与内梅洛综合指数评价结果显示, 研究区域重金属元素单因子污染指数为 $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Hg}$ , 指数均小于污染评价限值( $P_f=1.0$ ); 内梅罗综合值为土层 $0\sim 20\text{ cm} > 20\sim 40\text{ cm} > 40\sim 60\text{ cm}$ , 且均小于污染标准限值( $P_{综}=0.7$ )。该园区内土壤通气性、保水保肥性能良好, 养分供应状况正常, 环境质量优秀, 具有较好的生产潜力。

**关键词** 深圳大鹏半岛; 土壤; 理化性质; 生态评价

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053(2023)01-0071-10

## Analysis of Soil Physical and Chemical Properties and Ecological Evaluation of Dapeng Peninsula National Geopark in Shenzhen

ZHANG Haohua YE Qiang BAO Ziyu CHEN Ziluan  
YANG Haijun LI Wei YU Xinhua  
(South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

**Abstract** To understand the actual fertility level and production potential for the forest soil in the Shenzhen Dapeng Peninsula National Geopark, the basic physical and chemical properties and soil ecological evaluation of the soil in the park were analyzed by using experimental analysis and statistical data compilation. The results showed that: 1) The soil in the study area is mainly loamy soil with less gravel and medium gravel, accounting for more than 65% of the park. 2) The soil bulk density ranged from  $1.10$  to  $1.35\text{ g/cm}^3$ , the natural water content was  $59.49\sim 402.15\text{ g/kg}$ , and the capillary water holding capacity from  $102.00$  to  $859.95\text{ g/kg}$ , pH value was  $4.01\sim 5.27$ , the organic matter content was  $0.32\sim 45.85\text{ g/kg}$ , the total nitrogen content was  $0.02\sim 7.74\text{ g/kg}$ , the available phosphorus

\* 基金项目: 深圳大鹏半岛国家地质公园植被与地质环境协同演化研究项目(SZDL2020334205), 广东省林木种质资源普查(GDZZDC20228703)。

第一作者: 张豪华(1996—), 男, 在读硕士, 研究方向为植物土壤生态, E-mail: 631683933@qq.com。

通信作者: 俞新华(1963—), 男, 讲师, 主要从事植物学研究, E-mail: xhyu@scau.edu.cn。

content was 0.01-8.29 mg/kg, and the carbon-nitrogen ratio was 1.63-53.61. 3) The soil physical and chemical properties of the study area showed different degrees of regularity according to different soil depths, and the capillary water holding capacity showed a decreasing law from top to bottom. The soil bulk density and capillary water holding capacity showed an opposite law and increased sequentially from top to bottom. The characteristics of total nitrogen and available phosphorus content decrease layer by layer with the increase of soil depth. 4) The evaluation results from single-factor index and Nemeru composite index showed that the single-factor pollution index of heavy metal elements in the study area was  $Pb > Zn > Cr, Cu, Ni > Cd > As > Hg$ , and the indices were all less than the pollution assessment limit ( $P_i = 1.0$ ). The comprehensive value of Nemeru was 0-20 cm > 20-40 cm > 40-60 cm in the soil layer, and all of them were less than the pollution standard limit ( $P_{综} = 0.7$ ). This park has good soil aeration, water, and fertilizer retention, normal nutrient supply condition, excellent environmental quality, and good production potential.

**Key words** Dapeng Peninsula; soil; physicochemical properties; ecological evaluation

深圳大鹏半岛国家地质公园是华南沿海地区“燕山运动”留下的一个典型的火山岩喷发地,受太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲及后期的板块分离与海侵,形成了丰富的地质地貌,以古火山遗迹和海岸地貌为特征,包含多处地质遗迹景观群,形成中国南方沿海具有代表性的地质景观,其山海相依、水火共融的地貌特征独具一格,是我国东南沿海颇有代表性的山水地质胜地,也是科普教育、科学研究的理想园地<sup>[1]</sup>。

2004年,秦新生<sup>[2]</sup>对深圳大鹏半岛蕨类植物区系及其生态特点进行了探讨;同年,邢福武<sup>[3]</sup>对深圳市七娘山郊野公园植物资源进行了调查;2005年9月,国土资源部正式批准成立深圳大鹏半岛国家地质公园;深圳地区自2008年以来,先后进行了《深圳地质》的编纂出版、深圳大鹏半岛国家地质公园古火山地质遗迹调查、中生代火山岩及火山作用等的研究工作<sup>[1,4-5]</sup>;2011年代晓康<sup>[6]</sup>对深圳大鹏半岛珍稀濒危植物进行了调查;2013年庄馨<sup>[7]</sup>对深圳大鹏半岛国家地质公园野生脊椎动物资源进行了调查;2016年赵晴<sup>[8]</sup>用生物多样性等7个指标对深圳大鹏半岛市级自然保护区生态质量评价分析。土壤是植物生长发育的介质,也是植物生长所需各种营养的主要来源之一。土壤理化性质的基本情况决定了土壤肥力状况,进一步决定土壤的生产力大小。前人对深圳大鹏半岛自然保护区或大鹏半岛国家地质公园的调查研究多集中于动植物资源与地质环境特征,对土壤资源的相关调查仍较少。

生态系统是生物有机体及其周围环境组成的综合体,区域内的各种生物有机体和环境因子相互联系、相互制约,组成不同的生态系统,进行着纷繁复杂的生态过程,单一因子无法准确描述这一综合

体,单项调查也无法查明区域生态环境的现状,必须开展系统性调查。对深圳大鹏半岛国家地质公园进行土壤理化性质分析与生态评价,有助于了解其土壤的现实肥力水平和生产潜力,为进一步认识土壤-植物-岩石的关联性及其相互作用规律提供背景资料,对进行生态地质环境保护、治理以及林地利用规划与林地资源可持续利用具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

深圳大鹏半岛国家地质公园位于广东省深圳市大鹏半岛东南端,22°29'~22°33' N, 114°31'~114°37' E,总面积46.073 km<sup>2</sup>,属南亚热带海洋性季风气候。光照充足,热量丰富,降水充沛,空气湿润。分干湿两季,干季短,湿季长,无霜期长,风向随季节改变,气候垂直变化差异大。太阳辐射量丰富,年太阳辐射量为5 225 MJ/m<sup>2</sup>,年日照达2 011 h,年日照率为47%。全年降水量的85%出现在4-9月。年平均风速为2.7 m/s,年主导风向为东南风。年平均气温为22.3 °C。冬季受极地大陆气团及其变性气团的影响,较为干凉,1月平均气温为14 °C,盛行的东北季风使地质公园处于旱季低温干燥,而夏季太平洋东南季风给地质公园带来充沛雨量,年平均降水量为2 000 mm,年平均雨日140天,相对湿度为80%,属于高温多雨地区。地质公园三面环海,东靠大亚湾与惠阳市部分岛屿隔海相对,西隔大鹏湾与香港新界相望,南部是中国南海海域,区域内主峰七娘山海拔869.7 m,为该区内最高峰<sup>[9]</sup>。

### 1.2 样品采集

研究区域内选择典型的、具代表性的地段设

置 34 个土壤样方，在土壤样方内挖掘 1 个规格为 1.0 × 1.5 m 长方形土壤剖面。根据地表枯落物的积累情况和土壤颜色、质地、结构和松紧度等把土壤划分为若干个层次，按照 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 分层采集

约 1 kg 土壤分析样品；再分别用环刀与小铝盒采集每层新鲜土壤样品，用于土壤自然水含量与容重测定，全部密封带回待处理，每层做 3 个重复。土壤样品采集信息分布见表 1。

表 1 大鹏半岛国家地质公园土壤样方信息  
Table 1 Dapeng peninsula national geopark soil quadratic information

编号 Number	采集地 Collection place	经纬度 Lng and lat	海拔 /m Alt.	坡向 Asp.	植被类型 Vegetation types
DT001	大鹏东涌 2 号岗亭（路灯 193 号）	114°34'26.09"E 22°29'47.47"N	33	正南	常绿阔叶灌丛
DT002	大鹏东涌 2 号岗亭（路灯 193 号）	114°34'25.29"E 22°29'50.84"N	100	正西	常绿阔叶林
DT003	大鹏新大七娘山主峰登山道半山下部	114°32'13.82"E 23°31'31.14"N	255	西北	常绿阔叶林
DT004	大鹏新大七娘山主峰登山道山体中部	114°32'29.76"E 23°31'30.10"N	442	西北	常绿阔叶林
DT005	大鹏新大七娘山主峰登山道山体上部山坡地	114°32'34.61"E 23°31'24.38"N	588	正北	常绿阔叶林
DT006	大鹏新大七娘山主峰登山道山坡地	114°32'39.54"E 23°31'20.69"N	691	西北	常绿阔叶林
DT007	大鹏新大七娘山主峰登山道山坡地林下阴坡	114°32'46.68"E 22°31'19.87"N	770	西北	常绿阔叶林
DT008	大鹏新大七娘山主峰山顶洼地灌草丛	114°32'52.09"E 22°31'13.77"N	849	正西	禾草草丛
DT009	大鹏新区七娘山溪河边坡地	114°32'3.700"E 22°31'42.32"N	45	正西	常绿阔叶林
DT010	大鹏新区东涌养殖场旁	114°36'15.57"E 22°30'4.740"N	201	东北	常绿阔叶灌丛
DT011	大鹏新区东涌养殖场上 400 m 处	114°36'12.75"E 22°29'44.08"N	63	正南	常绿阔叶林
DT012	大鹏新区东涌养殖场上 400 m 处	114°32'33.33"E 22°32'39.47"N	294	正南	常绿阔叶灌丛
DT013	大鹏七娘山鹿雁线沿缓坡方向海拔 245 m 科考牌旁	114°36'1.430"E 22°31'43.80"N	246	东北	常绿阔叶灌丛
DT014	大鹏七娘山鹿雁线沿缓坡方向海拔 264 m 休息平台旁	114°35'58.90"E 22°31'41.91"N	268	东北	常绿阔叶林
DT015	大鹏七娘山鹿雁线沿缓坡方向 162 m 科考牌旁	114°36'9.490"E 22°31'55.00"N	154	正西	常绿阔叶灌丛
DT016	大鹏七娘山主峰山顶南（阳坡）	114°32'52.27"E 22°31'9.170"N	813	正南	禾草草丛
DT017	大鹏七娘山主峰山顶背（阴坡）	114°32'52.77"E 22°31'19.46"N	857	正东	禾草草丛
DT018	大鹏东涌 2 号岗亭上山 310 m 处右侧山坡	114°34'25.98"E 22°29'58.75"N	151	东南	常绿阔叶灌丛
DT019	大鹏东涌 2 号岗亭上山 620 m 处右侧山坡	114°34'28.01"E 22°30'3.610"N	252	西南	常绿阔叶灌丛

编号 Number	采集地 Collection place	经纬度 Lng and lat	海拔 /m Alt.	坡向 Asp.	植被类型 Vegetation types
DT020	大鹏东涌高排溪至马料河五月茶+鸭脚木群落	114°36'57.72"E 22°29'59.16"N	22	西南	常绿阔叶灌丛
DT021	大鹏东涌高排至长角间	114°36'38.79"E 22°29'50.45"N	63	正东	常绿阔叶灌丛
DT022	大鹏半岛高岭山顶	114°32'40.59"E 22°32'17.11"N	585	正东	常绿阔叶灌丛
DT023	大鹏半岛高岭入口海拔 428 m 处	114°32'35.10"E 22°32'25.84"N	428	西南	常绿阔叶林
DT024	大鹏半岛七娘山碧洲村入口海拔 95 m 处左侧坡	114°31'57.04"E 22°32'16.92"N	95	正东	常绿阔叶灌丛
DT025	大鹏半岛七娘山碧洲村入口海拔 172 m 处左侧坡	114°32'7.350"E 22°32'22.35"N	172	西南	常绿阔叶林
DT026	大鹏半岛七娘山新东路东江壕家处上山海拔 12 m 处	114°31'46.00"E 22°32'59.35"N	12	正东	常绿阔叶林
DT027	大鹏半岛七娘山鹿雁线大雁顶北坡	114°35'20.02"E 22°31'4.090"N	796	正北	禾草草丛
DT028	大鹏半岛新东路生态监测中心站旁山坡	114°35'25.04"E 22°32'16.68"N	34	西北	常绿阔叶林
DT029	大鹏半岛大鹿湖溪南山坡中上部	114°33'31.55"E 22°30'9.290"N	189	正北	常绿阔叶林
DT030	大鹏半岛七娘山大鹿湖坑线距大鹿湖 300 m 处	114°33'28.85"E 22°30'20.97"N	203	西南	常绿阔叶林
DT031	大鹏半岛七娘山磨郎钩前 200 m 处右侧山坡	114°33'38.95"E 22°31'9.900"N	565	西北	常绿阔叶林
DT032	大鹏半岛七娘山主峰山顶至三角石路线距川螺石 700 m 处	114°34'3.190"E 22°30'59.22"N	526	西北	禾草草丛
DT033	大鹏半岛七娘山杨梅坑左支线 900 m 处左侧山坡	114°34'25.39"E 22°32'9.860"N	50	正南	常绿阔叶林
DT034	大鹏半岛七娘山杨梅坑左支线正尾坑左侧山坡	114°34'28.44"E 22°31'56.08"N	76	西北	常绿阔叶林

### 1.3 土壤样品处理

土壤样品在通风阴凉的室内除杂后自然风干 10~14 天。环刀和小铝盒样品在 1~2 天内完成分析。土样充分风干后用四分法称取样品 500 g 左右充分研磨,分别得到 2 mm、0.25 mm、0.15 mm 待测分析土样。

### 1.4 测试指标与方法

土壤质地采用简易比重法测定;土壤自然含水量采用烘干法测定;毛管持水量和容重采用环刀法测定;pH 采用离子选择电极法(ISE)测定;有机质采用重铬酸钾外热源法测定;全氮采用半微量开氏法((K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CuSO<sub>4</sub>-Se 蒸馏法)测定;有机质与全氮丰缺程度分级标准参照第二次土壤普

查中土壤含量划分;具体操作方法参照鲍士旦主编的第三版《土壤农化分析》<sup>[10]</sup>;土壤污染评价方法采用单因子指数法与内梅罗综合指数法<sup>[11-12]</sup>。

### 1.5 数据处理

通过 Excel 2013 进行数据处理。

### 1.6 土壤质地分类

采用砾石含量与卡庆斯基制简明系统结合的方法进行土壤质地的划分<sup>[13]</sup>。

### 1.7 土壤重金属选取标准

根据《土壤环境质量》(GB15618-2018)<sup>[14]</sup>与 2019 年广东省林业局发布的广东省林地土壤调查工作实施方案(粤林函【2019】476 号)的要求,并参照深圳地方标准——土壤环境背景值

(DB4403-T68-2020)，选取重金属元素镉 Cd、汞 Hg、砷 As、铅 Pb、铬 Cr、铜 Cu、镍 Ni、锌 Zn 和锰 Mn 进行含量分析与生态评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤质地

从砾石含量分析（表 2、3），大鹏半岛国家地质公园土壤非砾质土壤占总土样的 23.13%；少砾质、中砾质、多砾质分别占 44.38%、23.13% 和 9.38%，可见，研究区域少砾质性土壤占比最大，非砾质和中砾质水平相当，多砾质最少；根据卡庆斯基制土壤质地分类简明系统可以将土壤质地分为 9 种类型，据统计，研究区域土壤质地共有 6 种类型，分别是紧砂土、砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土和轻粘土，其中数量最多的是中壤土，占园区总土样的 36.25%；最少的为紧砂土，占比 1.25%。将砾石含量和卡庆斯基质地类型两两组合，可以将研究区域土壤质地划分为 18 种类型，结果如图 1，其中少砾质重壤土占总土样的 16.88%，少砾质中壤土和中砾质中壤土分别占 10.00%，这 3 种类型的土壤质地共占总土样约 40%；中粒质轻粘土和多砾质重壤土类型占总区域最低，均为 0.63%。

表 2 大鹏半岛国家地质公园土壤石质性程度  
Table 2 The degree of soil rock quality in Dapeng Peninsula National Geopark

砾石性程度 Gravel degree	土样数量 Soil number	占比 /% Ratio
非砾质 Non-gravel	37	23.13
少砾质 Less gravel	71	44.38
中砾质 Medium gravel	37	23.13
多砾质 Gravelly	15	9.38
总计 Sum	160	100

注：因土层实际厚度，编号为 DT007、DT017 取两层；编号 DT030、DT031 取 3 层。

Note: Due to the actual thickness of the soil layer, the numbers DT007 and DT017 are taken from two layers; DT030 and DT031 take three layers.

表 3 卡庆斯基制土壤质地数量统计  
Table 3 Quantitative statistics of the soil texture of the Kaczynski system

质地名称 Name	土样数量 Soil number	占比 /% Ratio
紧砂土 Blue sand soil	2	1.25
砂壤土 Sandy loam	20	12.50
轻壤土 Light loam	24	15.00
中壤土 Loam soil	58	36.25
重壤土 Heavy loam	47	29.38
轻粘土 Light clay	9	5.63
总计 Sum	160	100

注：I：非砾质轻壤土；II：非砾质中壤土；III：非砾质重壤土；IV：非砾质轻粘土；V：少砾质紧砂土；VI：少砾质砂壤土；VII：少砾质轻壤土；VIII：少砾质中壤土；IX：少砾质重壤土；X：少砾质轻粘土；XI：中砾质砂壤土；XII：中砾质轻壤土；XIII：中砾质中壤土；XIV：中砾质重壤土；XV：中砾质轻粘土 XVI：砾质轻壤土 XVII：多砾质中壤土 XVIII：多砾质重壤土。

Note: I : Non-gravel light loam; II : Non-gravel medium loam; III : Non-gravel heavy loam; IV : Non-gravel light clay; V : Less gravel compact sand; VI : Less gravel sand Loam; VII: Light loam with little gravel; VIII: Medium loam with little gravel; IX: Heavy loam with little gravel; X : Light clay with little gravel; XI: Sandy loam with medium gravel; XII: Light loam with medium gravel; XIII: Medium gravelly medium loam; XIV: Medium gravel heavy loam; XV: Medium gravel light clay; XVI: Gravelly light loam; XVII: Medium gravelly medium loam; XVIII: Heavy gravelly loam.

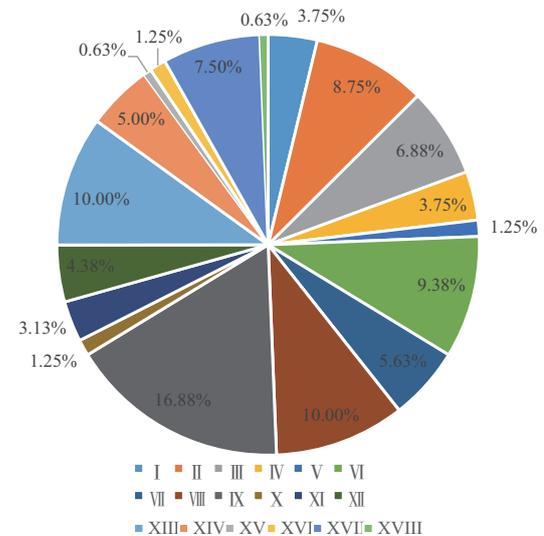


图 1 大鹏半岛国家地质公园土壤质地类型

Figure 1 Soil texture types of Dapeng Peninsula National Geopark

## 2.2 土壤容重与水分状况

对研究区域 160 个土壤样本的自然含水量、毛管持水量和土壤容重值进行统计 (表 4)。从整体水平分析, 结果显示, 研究区域土壤自然含水量介于 59.49~402.15 g/kg; 毛管持水量介于 102.00~859.95 g/kg; 土壤容重为 0.73~1.62 g/cm<sup>3</sup>; 平均值分别为 190.72 g/kg、335.66 g/kg、1.27 g/cm<sup>3</sup>; 三者的变异系数分别为 33.59%、26.93% 和 13.07%, 均介于 10%~100% 之间, 属于中等变异性。从土壤深度分析, 研究区域土壤自然含水量相对稳定, 分布较为均匀, 在 190 g/kg 左右浮动; 土壤毛管持水量则呈自上而下递减规律; 土壤容重与毛管持水量呈相反规律, 即自上而下依次递增, 符合土壤自上而下由松软到紧实的一般性规律。

## 2.3 土壤 pH

总体上 (将同一编号各层土壤样品混合后分析所得, 下同), 研究区域土壤 pH 值为 4.01~5.27 (表 5), 平均值为 4.66, 呈强酸性, 变异系数为

5.00%, 属于低变异性。从土壤深度分析, 研究区域土壤 pH 有细微变化, 随着土层的深度增加土壤 pH 逐渐增大, 即土壤酸性自上而下随土层深度加深而逐渐降低, 但数值变化幅度较小, 仍为强酸性, 表明研究区域土壤 pH 较稳定。

## 2.4 土壤营养与肥力

参照全国第二次土壤普查标准<sup>[15]</sup>划分土壤有机质与全氮丰缺程度 (表 6), 从表 7 可知, 研究区域土壤有机质含量整体水平偏低, 超过 80% 的土壤样品划分为偏低与缺乏水平, 有机质丰富的土样占总土样的 8.76%; 全氮含量整体水平与有机质相似, 为缺乏水平; 其中极缺乏占土样二分之一以上; 速效磷平均含量为 0.61 mg/kg, 变异系数为 198.16%, 属于强变异; C/N 均值为 11.40, 变异系数 52.40%, 属于中等变异; 表明研究区域土壤整体有机营养与肥力水平偏低, 速效磷区域性差异较大。

从土壤分层上看 (表 7、8), 研究区域有机质、全氮、速效磷均为表层土壤 (0~20 cm) 含

表 4 大鹏半岛国家地质公园土壤水分状况和土壤容重统计特征

Table 4 Statistical characteristics of soil moisture and soil bulk density in Dapeng Peninsula National Geopark

土层 / cm Soil layer	土样数 Number	自然含水量 / (g · kg <sup>-1</sup> ) Natural moisture content				毛管持水量 / (g · kg <sup>-1</sup> ) Capillary water holding capacity				土壤容重 / (g · cm <sup>-3</sup> ) Bulk density			
		最小 值 Min	最大 值 Max	平均 值 Mean	变 异 系 数 /% CV	最小 值 Min	最大 值 Max	平均 值 Mean	变 异 系 数 /% CV	最小 值 Min	最大 值 Max	平均 值 Mean	变 异 系 数 /% CV
0~20	34	80.55	402.15	187.71	41.18	198.77	859.95	396.04	33.07	0.73	1.46	1.10	15.68
20~40	34	66.68	387.18	189.87	35.82	187.20	584.69	335.59	22.68	0.88	1.50	1.27	11.79
40~60	32	82.29	283.90	186.98	28.64	189.16	492.42	313.35	18.78	1.07	1.59	1.33	8.71
60~80	30	78.37	289.28	192.61	29.93	158.28	473.43	320.08	20.42	1.06	1.53	1.32	8.79
80~100	30	59.49	306.87	197.19	31.97	102.00	416.10	306.68	22.48	1.11	1.62	1.35	9.92
总体 Sum	160	59.49	402.15	190.72	33.59	102.00	859.95	335.66	26.93	0.73	1.62	1.27	13.07

表 5 大鹏半岛国家地质公园土壤 pH 值统计特征

Table 5 Statistical characteristics of soil pH in Dapeng Peninsula National Geopark

土层 /cm Soil layer	样品数 Number	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 /% CV
0~20	34	4.01	5.18	4.53	4.99
20~40	34	4.19	5.04	4.61	3.88
40~60	32	4.33	5.11	4.66	3.68
60~80	30	4.40	5.14	4.75	4.25
80~100	30	4.36	5.27	4.78	4.54
总体 Sum	160	4.01	5.27	4.66	5.00

表 6 大鹏半岛国家地质公园土壤有机质与全氮含量分级评价

Table 6 Grading evaluation of soil organic matter and total nitrogen content in Dapeng Peninsula National Geopark

丰缺程度 Degree of abundance	有机质 Organic matter			全氮 Total nitrogen		
	含量 / (g/kg)	数量 Number	百分比 / % Ratio	含量 / (g/kg)	数量 Number	百分比 / % Ratio
极缺乏 Extremely lacking	≤ 6.00	52	32.50	≤ 0.5	83	51.88
缺乏 Lacking	6.00~10.00	37	23.13	0.50~0.75	38	23.75
偏低 Low	10.00~20.00	44	27.50	0.75~1.00	12	7.50
中等 Medium	20.00~30.00	13	8.13	1.00~1.50	13	8.13
丰富 Rich	30.00~40.00	7	4.38	1.50~2.00	8	5.00
很丰富 Very rich	> 40.00	7	4.38	> 2.00	6	3.75
合计 Sum		160	100		160	100

表 7 大鹏半岛国家地质公园土壤有机质、全氮、速效磷、C/N 统计特征

Table 7 Statistical characteristics of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and C/N in Dapeng Peninsula National Geopark

土层 /cm Soil layer	有机质 / (g/kg) Organic matter				全氮 / (g/kg) Total nitrogen			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 / % CV	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 / % CV
0~20	4.89	45.85	25.70	51.09	0.20	7.74	1.39	96.00
20~40	4.05	36.55	13.42	57.08	0.11	3.20	0.76	75.27
40~60	0.77	18.32	8.74	48.03	0.07	0.96	0.48	45.26
60~80	0.54	11.49	5.68	54.11	0.06	0.76	0.35	51.78
80~100	0.32	16.78	5.41	73.18	0.02	0.81	0.33	58.38
总体 Sum	0.32	45.85	12.14	88.10	0.02	7.74	0.68	115.42

表 8 大鹏半岛国家地质公园土壤有机质、全氮、速效磷、C/N 统计特征

Table 8 Statistical characteristics of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and C/N in Dapeng Peninsula National Geopark

土层 /cm Soil Layer	速效磷 / (mg/kg) Available Phosphorus				碳氮比 C/N			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 / % CV	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	变异系数 / % CV
0~20	0.01	6.46	1.23	146.04	3.42	37.93	12.96	45.53
20~40	0.01	8.29	0.66	241.51	2.11	21.94	11.48	30.01
40~60	0.01	1.83	0.31	150.68	3.57	33.10	11.04	45.34
60~80	0.01	3.09	0.43	145.62	1.66	30.31	10.37	53.34
80~100	0.01	2.21	0.37	146.32	1.63	53.61	10.99	81.92
总体 Sum	0.01	8.29	0.61	198.61	1.63	53.61	11.40	52.40

量最高,其平均值分别为 25.70 g/kg、1.39 g/kg、1.23 mg/kg,其含量随土层的深度加深呈递减的趋势。有机质的变异系数在 48.03%~73.18% 之间,其中变异性最大的为土层 80~100 cm,最大值与最小值相差约 50 倍;全氮变异系数为 45.26%~96.00%,最大变异为表层土壤,最大值为 7.74 g/kg,最小值为 0.20 g/kg;从变异系数分析,均属于中等变异;研究区域内有机质含量的组成还需要结合相关因子进行进一步探讨。速效磷的平均含量为 0.31~1.23 mg/kg,变异系数为 146.04%~241.51%,属于强变异性,最大值为 8.29 mg/kg,在 20~40 cm 土层,每一层都有最小值分布,研究区域土壤 C/N 为 10.37~12.96,碳氮供应处于适中水平,表层土壤 C/N 最大,60~80 cm 最低,其余土层接近。

## 2.5 土壤重金属含量与评价

选取重金属镉 Cd、汞 Hg、砷 As、铅 Pb、铬 Cr、铜 Cu、镍 Ni、锌 Zn 和锰 Mn 共 9 种重金属

元素进行土壤污染评价。研究区域 9 种土壤重金属含量均未超过标准限值(表 9),所有元素含量远远低于标准限值。除重金属 Mn 含量随土层深度变化,其他元素无明显变化,表明研究区域重金属分布稳定,无明显区域和深度差异。

用单因子指数评价法和内梅罗综合评价法对研究区域土壤进行重金属现状评价,结果显示(表 10),总体上,研究区域所有重金属元素单因子指数值均小于 1.0,指数值大小为  $Pb > Zn > Cr, Cu, Ni > Cd > As > Hg$ ,全部值都小于污染评价的指数值,属于无污染;内梅罗综合指数为 0.33,低于 0.7,属于无污染水平。从土壤分层情况分析,上层(0~40 cm)土壤污染指数略小于下层(40~80 cm);内梅罗综合指数为土层 0~20 cm > 20~40 cm > 40~60 cm,60~80 cm 与 40~60 cm 指数一样,均为无污染,纵向深度越大差距越小;综合表明研究区域土壤环境质量优秀,无重金属污染。

表 9 大鹏半岛国家地质公园土壤重金属含量

Table 9 Content of heavy metals in the soil of Dapeng Peninsula National Geopark

土层/cm Soil layer	标准限值/(mg/kg) Standard limit								
	Cd ≤ 0.30	Hg ≤ 1.30	As ≤ 40	Pb ≤ 70	Cr ≤ 150	Cu ≤ 50	Ni ≤ 60	Zn ≤ 200	Mn ≤ 1 500
0~20	0.02	0.01	1.36	28.92	14.97	5.41	5.91	56.31	85.80
20~40	0.03	0.01	1.28	30.75	14.86	4.69	5.29	59.53	70.97
40~60	0.03	0.02	1.45	32.83	16.13	4.84	5.94	59.20	90.78
60~80	0.03	0.02	1.36	32.79	16.07	5.16	6.06	60.22	100.06
总体 Sum	0.03	0.02	1.36	31.25	15.48	5.02	5.79	58.77	86.44

表 10 大鹏半岛国家地质公园土壤重金属单因子指数与内梅罗综合指数

Table 10 Dapeng Peninsula National Geopark soil heavy metal single factor index and Nemerow composite index

土层/cm Soil layer	标准限值/(mg/kg) Standard limit									内梅罗综合指数 $P \leq 0.70$
	Cd ≤ 0.30	Hg ≤ 1.30	As ≤ 40	Pb ≤ 70	Cr ≤ 150	Cu ≤ 50	Ni ≤ 60	Zn ≤ 200	Mn ≤ 1500	
0~20	0.08	0.01	0.03	0.41	0.10	0.11	0.10	0.28	0.06	0.31
20~40	0.09	0.01	0.03	0.44	0.10	0.09	0.09	0.30	0.05	0.32
40~60	0.10	0.01	0.04	0.47	0.11	0.10	0.10	0.30	0.06	0.35
60~80	0.10	0.01	0.03	0.47	0.11	0.10	0.10	0.30	0.07	0.35
总体 Sum	0.09	0.01	0.03	0.45	0.10	0.10	0.10	0.29	0.06	0.33

### 3 结论与讨论

深圳大鹏半岛国家地质自然公园具有丰富的植被群落类型，这得益于其林下土壤的肥力特征与生态效益。土壤质地的类型决定着土壤蓄水导水性能，保肥供肥能力，保温导温性，土壤呼吸通气以及土壤耕性等<sup>[16]</sup>。研究区域内土壤质地主要为砾质壤土类型，这类型的土壤在山地林区比较常见，土中石砾可以提高土温，增加孔隙度，有利于通气透水，同时壤质保水保肥、供水供肥能力较强，这使得土壤中水、肥、气、热以及植物扎根条件协调，表明研究区域内土壤保水保肥性能较好，土壤通水透气，结构性好，具有耐旱耐涝，抗逆性强、适种性广等优点，是较为理想的质地类型。

土壤容重是衡量土壤松紧状况的指标，能综合反映土壤结构、保水透气等物理性质。李卓等<sup>[17]</sup>通过人工配制典型砂壤土、中壤土与粘壤土模拟自然条件下，容重对土壤水分的渗透性影响，结果表明土壤渗透性随着容重增大递减。研究区域内土壤容重与毛管持水量的负相关性符合这一规律。一般来说，疏松的土壤条件更有利于植物的生长发育，这一现象直接体现在土壤通气透水性上。林波等<sup>[18]</sup>综述了森林凋落物的研究进展，表明土壤水分是影响凋落物分解的主要环境因子之一，也是影响土壤松紧度的关键因子。研究区域内自然水分状况良好，随着植物的生长，枯落物分解、释放进入土壤，改善了土壤理化性质，使得表层土壤密度减少、孔隙度增加，持水能力增强，表明研究区域土壤森林储水量丰富，土壤松软度适宜，土壤物理性质保持较好。疏松的土壤增大了导水和蓄水能力，林地土壤的持水能力较高，可以起到调节径流、削减洪峰、减少输沙的作用<sup>[19]</sup>。

土壤酸碱度是土壤动态平衡过程中集中表现出来的性质。土壤酸化主要是由土壤中活性 $H^+$ 引起， $H^+$ 的酸源主要是植物残体或凋落物分解、根系代谢产物和一些矿物成分中含有酸性基经氧化而产生的硫酸，以及大气降水中的碳酸<sup>[20]</sup>。研究区域内不仅有着丰富的植物群落类型，由植物残体与凋落物的分解为土壤提供大量的 $H^+$ ，而且加上丰富的降水—酸雨的影响，共同提供了丰富的 $H^+$ ，致使研究区域内的土壤呈强酸性，变异性不大，区域分布稳定，但随着土层深度增加土壤中

的植物残体和凋落物减少，雨水冲刷能力减弱，导致土壤酸度逐渐减弱，导致土壤酸性随着土壤深度逐渐减弱。

土壤有机质是土壤中所有含碳的有机化合物的统称，主要来源森林凋落物、枯死根系、森林动物、土壤小动物的排泄物和尸体以及微生物的代谢产物等，而有机质是自然土壤氮素的最主要来源<sup>[21-22]</sup>。研究区域内植被丰富，生物量大，是天然的碳源和氮源，但土壤有机质含量和腐殖质的组成还与母岩种类、植被类型、气候因子等诸多复杂因素有关<sup>[23]</sup>，所以仅从植物的新陈代谢和土壤微生物的分解与合成层面分析，区域内表层土壤（0~20 cm）有机质和全氮含量基本处于中等偏低水平，随着土壤深度增加呈现递减的趋势，具体是什么原因导致有机质与全氮含量偏低，仍需进一步探讨。土壤速效磷是土壤中容易被植物吸收利用的磷，其含量大小是衡量土壤磷素供应水平状况的较好指标，土壤中磷素主要来源是长期岩石的风化和矿物质的形成以及人类生活。在酸性的亚热带森林土壤中，磷元素易与铁、铝的氢氧化合物及其离子形成不溶性的磷化合物（磷酸铁、铝化合物）沉淀，导致森林土壤磷含量普遍亏缺，由于速效磷只占全磷的极小部分，全磷缺失导致的速效磷含量也随之偏低<sup>[24]</sup>。研究区域位于自然保护区内，多年来，得益于自然保护区生态保护工作，排除人为干预的影响。南方的红壤与赤红壤由第四纪红色黏土为母质发育而来，其速效磷含量较低，加上磷素循环主要在植物与土壤系统中<sup>[25]</sup>，植被类型的差异导致速效磷分布的不稳定性，因此研究区域内速效磷的变异性较大。土壤的C/N是土壤中相对稳定的指标，通常情况下，在同一气候条件下的C/N相对稳定，研究区域位于南亚热带海洋性季风气候带，C/N值在11.40上下浮动，属于正常水平，表明该区域土壤碳氮供应正常。

土壤重金属污染是土壤无机污染较为严重的问题，由于大部分重金属难以被土壤微生物分解，随着食物链的传播影响人体健康<sup>[26-28]</sup>，因此对森林土壤中重金属污染程度和生态风险评价等研究是十分重要的<sup>[29]</sup>。土壤中重金属来源主要来源成土母质和成土过程以及人为干预。研究区域内自然保护较好，几乎无人干预，重金属的来源主要是成土母质和成土过程。参照国家标准和地方

标准, 研究区域所有的重金属元素无超标现象, 属于清洁水平。综合两种常见的重金属污染评价方法, 得出结果无污染, 说明研究区域内土壤环境质量良好。

土壤是植物生长的基本环境要素, 为植物生长发育提供了必要的条件, 包括物理支撑作用、水分、养分、空气和热量的供应与协调作用, 总体上, 研究区域土壤通气性、保水保肥性能良好, 养分供应状况正常, 生态环境质量优秀, 具有较好的生产潜力。

### 参考文献

- [1] 梅村, 唐跃林, 张崧, 等. 深圳大鹏半岛中生代火山岩地质地貌特征: 以大鹏半岛国家地质公园为例[J]. 热带地理, 2010, 30(4): 341-347.
- [2] 秦新生, 张永夏, 严岳鸿, 等. 深圳市大鹏半岛蕨类植物区系及其生态特点[J]. 植物研究, 2004, 24(2): 146-151.
- [3] 邢福武, 周远松, 龚友夫, 等. 深圳市七娘山郊野公园植物资源与保护[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [4] 深圳地质编写组, 深圳地质[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [5] 梅村, 唐跃林, 张崧, 等. 深圳大鹏半岛国家地质公园中生代火山地层的时代讨论[J]. 地层学杂志, 2011, 35(4): 454-462.
- [6] 代晓康, 常颖, 胡平, 等. 深圳大鹏半岛珍稀濒危植物调查与分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 632-635.
- [7] 庄馨, 曹世奎, 胡观冠. 深圳大鹏半岛国家地质公园野生脊椎动物资源调查[J]. 热带地理, 2013, 33(5): 582-587.
- [8] 赵晴, 孙红斌, 陈丹, 等. 深圳市大鹏半岛市级自然保护区生态质量评价分析[J]. 南方农业, 2016, 10(18): 222-225;227.
- [9] 张崧, 孙现领, 王为, 等. 广东深圳大鹏半岛海岸地貌特征[J]. 热带地理, 2013, 33(6): 647-658.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [11] 孔凡彬, 刘阳. 单因子指数法和内梅罗指数法在土壤环境质量评价中的比较[J]. 甘肃科技, 2014, 30(3): 21-22.
- [12] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310-315.
- [13] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- [14] 生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [15] 尹春梅, 施建平, 潘恺, 等. 广东土种志: 基于全国第二次土壤普查数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2018, 3(1): 61-74.
- [16] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004: 121-122.
- [17] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [18] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004(1): 60-64.
- [19] 温美丽, 杨龙, 王钧, 等. 南岭森林的土壤保持功能[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(2): 123-130.
- [20] 潘根兴. 土壤酸化过程的土壤化学分析[J]. 生态学杂志, 1990(6): 50-54.
- [21] 张城, 王绍强, 于贵瑞, 等. 中国东部地区典型森林类型土壤有机碳储量分析[J]. 资源科学, 2006(2): 97-103.
- [22] 张勇, 庞学勇, 包维楷, 等. 土壤有机质及其研究方法综述[J]. 世界科技研究与发展, 2005(5): 78-84.
- [23] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008(5): 778-783.
- [24] 来璐, 郝明德, 彭令发. 土壤磷素研究进展[J]. 水土保持研究, 2003(1): 65-67.
- [25] 吴小龙, 龚霞, 曹灯, 等. 根际土壤磷素有效性的研究进展[J]. 江西农业学报, 2022, 34(1): 127-133.
- [26] 谭琳, 肖丽娜, 江瑶, 等. 森林土壤重金属空间分布特征及污染评价: 以华南沿海地区为例[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(1): 116-121.
- [27] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320;350;272.
- [28] 林雯, 李吉跃, 粟娟. 广州市城市林地土壤重金属污染研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 25-29.
- [29] 叶彩红, 邹祖有, 许窈孜, 等. 粤北地区森林土壤重金属含量特征及生态风险评价: 以曲江为例[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(3): 39-46.