

深基坑大口径 PC 工法组合钢管桩成桩试验研究*

张竹庭

(上海建工集团工程研究总院,上海 201114)

[摘要] 以上海软土地区某深基坑工程为背景,通过 PC 工法组合钢管桩成桩打拔试验,分析大口径 PC 工法组合钢管桩在上海软土地区深基坑中的适用情况,并分析各阶段施工对邻近土体的影响。试验结果表明,在上海软土地区深基坑工程中采用 ICE 高频免共振锤进行大口径钢管围护桩打拔可行,钢管桩的打入顺畅度、咬合度及土塞情况等良好,拔出时未大量带土,打拔对邻近土体及周边环境的影响在可控范围内。根据试验结果对施工过程及设备参数提出建议,有助于正式施工顺利进行并对周边环境形成有效保护。

[关键词] 深基坑;钢管桩;PC 工法;试验;高频免共振

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)11-0069-05

Large Diameter PC Engineering Piles Test in Soft Soil Deep Excavation

ZHANG Zhuting

(Engineering General Institute of Shanghai Construction Group, Shanghai 201114, China)

Abstract: Taking a deep excavation project in the soft soil area of Shanghai as the background, the application of large-diameter PC construction method combined steel pipe piles in deep excavation in the soft soil area of Shanghai was understood through pile driving and pulling tests using PC construction method. The impact of each stage on adjacent soil was analyzed. The test results show that using ICE high-frequency resonance free hydraulic hammer for large-diameter steel pipe support and extraction is feasible in deep excavation engineering in soft soil areas of Shanghai. The smoothness, bite and soil blockage of the steel pipe piles are good, and there is no large amount of soil during extraction. The impact of extraction on adjacent soil and surrounding environment is within a controllable range. At the same time, suggestions for the construction process and equipment parameters are proposed based on the experiment, which helps to facilitate the smooth implementation of formal construction and effectively protect the surrounding environment.

Keywords: deep excavation; steel pipe piles; PC construction method; test; high frequency resonance-free

0 引言

PC 工法组合钢管桩(以下简称 PC 桩)是通过锁扣将钢管桩和拉森钢板桩相互咬合组成整体的全钢围护体系,具有绿色环保、施工高效、节约造价等优点。赵豫鄂等^[1]以宁波西洪大桥桥墩基坑支护工程为例,从基坑支护设计及施工工艺等方面进行阐述,可知 PC 桩在水上深基坑工程中应用时安全可靠且止水效果好。许海明等^[2]以杭州西子智慧产业园项目基坑围护工程为例,介绍了 PC 桩在

地下 1 层基坑工程中的应用,工程采用 $\phi 630$ 钢管与拉森钢板桩间隔施工。徐建军^[3]介绍了 PC 桩在浙江某地下 1 层综合大楼基坑工程中的应用,PC 桩直径为 630mm,桩长 16m,并对关键施工工艺进行了总结。PC 桩在民用基坑中的应用规格多为 $\phi 630$, $\phi 750$ 等,小直径、短长度的钢管桩,在市区环境保护要求较高的地下 2 层深基坑工程中较罕见。

本文以上海某绿色建筑示范工程为背景,对基坑工程中采用的 PC 桩进行打拔试验,了解大口径 PC 桩在上海软土地区深基坑中的适用情况,研究打拔阶段对邻近土体的影响,并通过试验优选施工设备及参数,以期为 PC 桩在上海地区深基坑工程中

* 上海市科学技术委员会科技计划(21DZ1203201);上海建工集团股份有限公司重点科研项目(22JCSF-35)

[作者简介] 张竹庭,高级工程师, E-mail: 542421078@qq.com

[收稿日期] 2023-11-15

的拓展应用提供借鉴。

1 工程概况

拟建建筑物为地下 2 层,桩筏基础,采用顺作法施工。基坑平面呈正方形,普遍区域开挖深度 10.15m,采用 PC 桩作为基坑围护结构。基坑南侧、西侧及北侧基本为空地,基坑东侧环境保护等级较高,坑外 14.5~16m 范围内有地上架空高压线、地下电信管线、给水管及电缆等较多市政管线,东侧坑外 35m 为 6 层住宅小区。

场地地质属于上海典型软土,主要土层及参数如图 1 所示。工程场地内分布有面积厚填土,夹杂碎砖、混凝土块等地下障碍物。基坑施工及试桩前,对厚填土区域进行了大面积清障,并用拌好的水泥土回填清障区域,回填平均厚度约 3m,水泥掺量 15%,压实系数为 0.94。

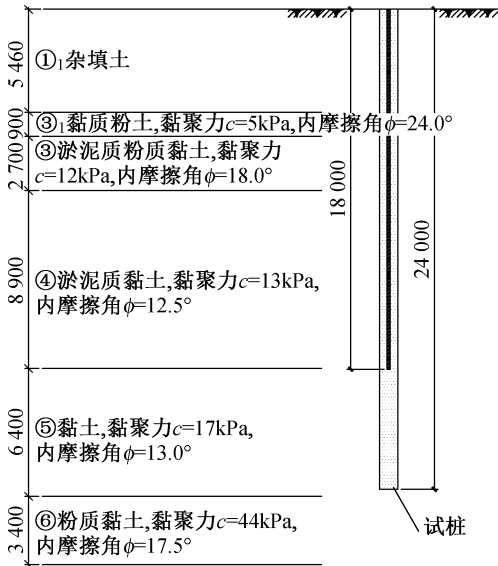


图 1 试桩及地质剖面

Fig. 1 Test pile and engineering geological profile

2 试桩设计

2.1 试桩内容及规格

在正式施工基坑围护桩前,需进行 PC 桩非原位打拔试验。试桩型号采用与基坑普遍区域型号相同的 PC 桩,即钢管桩采用 $\phi 915 \times 14$ 钢管,长 24m,间距 1.385m,钢管桩及锁扣材质为 Q355;相邻钢管桩之间采用 18m 长拉森钢板桩连接(见图 2)。试桩数量为 2 根钢管桩及 1 根拉森钢板桩,二者通过锁扣连接,试桩拔出后对土体拔桩空隙进行注浆。由于基坑几乎占满了用地红线,现场场地有限,故试桩点设置于基坑内部中央区域,在试桩前预应力混凝土管桩已施工完毕。

通过试验观察沉拔桩顺畅度、锁扣咬合情况、

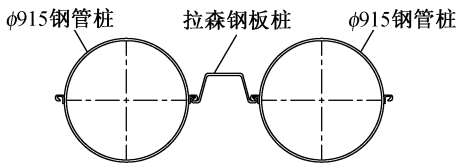


图 2 试桩截面

Fig. 2 Section of test piles

沉桩土塞情况及拔桩带土情况,并测试噪声,选择合适的施工设备及参数。同时,试验过程中对桩体及周边土体进行监测,测试 24m 范围内的土体隆沉、倾斜及孔隙水压力情况,了解 PC 桩插入及拔出对邻近土体的影响,确保周边环境的安全。

2.2 测点布置及监测频率

在距试桩 24m 内布置 10 组测点(见图 3),每组测点设分层沉降管、土体测斜管、孔隙水压力计,各测点的类型、位置及与试桩的平面距离如图 3 所示。其中,“●”表示分层沉降管,监测孔深度同钢管桩长度,竖向布置间距为 1m;“○”表示土体测斜管,监测孔深度同钢管桩长度,竖向为 1m;“⊕”表示孔隙水压力计,监测孔深度同钢管桩长度,竖向每个土层布置 1 个测点。

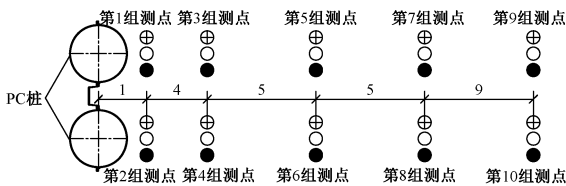


图 3 测点布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of measuring points(unit: m)

监测频率为试验前、沉桩至一半深度、沉桩至底部、沉至底部后 6,12,24h 和 3,7d 各 1 次及拔出至一半深度、拔出结束、拔出并注浆后 6,12,24h 和 3,7d 各 1 次。同时,在距离试桩 1,10,20m 处对成桩过程中噪声进行测试。

2.3 试桩设备及措施

试桩的主要打桩顺序为第 1 根钢管桩→拉森钢板桩→第 2 根钢管桩,其中,第 1 根长 24m 的钢管桩插入前,先用长 12m 的同截面钢管桩作为引孔桩(兼定位桩)进行引孔。引孔桩就位后,试桩在旁侧竖直立起就位;引孔桩打入后拔出,并立即将钢管桩对准引孔位打入(见图 4)。第 1 根钢管桩打入后,使桩顶露出地面 1m,以便专项控制员可检查、扶正相邻拉森钢板桩,确保相邻锁扣咬合无误后,再开始插打拉森钢板桩。

试桩打拔采用机械手振动锤与 ICE 高频免共振锤相互配合的方式进行。引孔桩及拉森钢板桩



图 4 试桩打入
Fig. 4 Test pile driving

打拔设备采用日立 600 机械手振动锤;24m 长钢管桩打拔设备采用荷兰 ICE 高频免共振锤,型号为 28RF,最大偏心力矩 $274\text{N} \cdot \text{m}$,最大频率 $2\,300\text{r}/\text{min}$,最大激振力 $1\,600\text{kN}$,最大静拔桩力 400kN ,最大振幅(含夹具)为 14mm 。

钢管桩打入前及打入过程中由专人指挥,采用经纬仪控制并校正钢管桩垂直度,垂直度偏差 $\leq L/250$ (L 为桩长)。

3 试桩效果分析

3.1 打拔顺畅度及咬合情况

试桩时,沉桩较顺畅,钢管桩可完整插入土中。第 1 根钢管桩的前半根桩经过引孔后,沉桩表现更顺畅,整根桩的施打时间为 30min 。中间的拉森钢板桩由于插打前由专人检查确保了锁扣无偏差咬合,且竖直的锁扣在沉桩过程中也起到了导向作用,故拉森钢板桩沉桩顺利。第 2 根钢管桩在前根拉森钢板桩锁扣的导向作用下完整沉入,但沉桩速度较第 1 根钢管桩慢,整根桩的施打时间为 45min ,平均沉速为 $0.6\text{m}/\text{min}$ 。可见,第 1 根钢管桩经过引孔后,沉桩更顺利;而从第 2 根无引孔桩的试桩速度可见,28RF 型号的 ICE 高频免共振锤在打桩速度方面不具优势。

本试验的钢管桩和拉森钢板桩锁扣管材均较新,锁扣质量较好,从试验过程看出,锁扣质量完好并搭接整齐对 PC 桩的沉桩顺畅度和锁扣咬合度是有利的。因此,本工程钢管与拉森钢板进场时将配备专人检查验收,锁扣部位为 100% 过目检查,保证锁扣完好,以确保沉桩顺利及沉桩后的止水效果。

3.2 精度及噪声

在试桩的垂直度及定位精度控制方面,由现场专人指挥,测量人员及起重机操作手密切配合,采用经纬仪交汇法控制 PC 桩的垂直度和定位精度,

试验显示 PC 桩沉桩可满足设计要求的垂直度及定位精度要求。此外,由第 1 根试桩结果可见,由于引孔桩长度较短,定位及垂直度较易控制,故采用引孔桩后,可使首根钢管桩的定位及垂直度更准确,避免围护桩过长而控制困难。基坑工程中,首根钢管桩的定位及垂直度将影响其他围护桩,因此本工程基坑首根钢管桩插入前,将采用较短的钢管桩先进行定位、引孔。

在噪声方面,通过试桩打入过程中分贝仪的测试可知,距离试桩 $1, 10, 20\text{m}$ 处的噪声分贝分别为 $128, 92, 85\text{dB}(\text{A})$,人员站立于距离试桩约 8m 的硬地坪处可感受到轻微振动。从噪声及单根打桩时间来看,28RF 型号的 ICE 高频免共振锤对本工程适用性略有不足,正式施工时考虑采用更高型号的 ICE 高频免共振锤。

3.3 沉桩土塞情况

一般情况下,开口桩(例如混凝土管桩)在沉桩过程中,桩端土受挤压后,会有部分土被压入桩管内形成“土塞”,另一部分土被挤向桩周,且进入管内的土柱可由不完全闭塞转化为完全闭塞状态^[4]。本工程围护钢管桩为开口桩,为了解桩体沉入后的土塞状况,对钢管桩打入后管内的土体情况进行观测。试验显示,钢管桩完全打入地面后,桩内无空腔,土体可充满整个钢管桩内部,钢管桩的入土比(管内土柱长与钢管桩入土长之比)为 100% 。开口钢管桩属于低排土桩,本工程钢管桩直径为 915mm ,壁厚 14mm ,可见在直径大、壁厚小的条件下,结合 ICE 高频免共振锤液化土壤,使桩体克服土壤摩擦力而下沉,可以实现桩体内部土体充盈,避免桩体上部产生空腔,从而影响围护桩承载力。

3.4 拔桩带土情况

PC 桩作为基坑围护结构,在地下室完成后可拔出回收,具有较好的经济性,且可避免形成地下障碍物。若桩体拔出时带出较多土壤,甚至拔出后在原桩位处留下大型土洞,会对周边环境造成较大影响。因此,对拔桩后桩体带土情况进行观测。拔桩同样采用 ICE 高频免共振锤进行,拔桩速度 $\leq 1\text{m}/\text{min}$,相比沉桩,拔桩更容易控制。试验显示,钢管桩拔出后,原桩位处无土体空洞,拔出后的钢管桩无大量带土,其内壁及外壁仅有少量斑驳的泥皮附着(见图 5),自然晾干后测得附着的泥皮厚 $2\sim 8\text{mm}$ 。可见,使用 ICE 高频免共振锤拔出大直径钢管桩是可行的,且拔出时带土较少,不会对周边环境产生较大影响。



图 5 试桩拔出

Fig. 5 Test pile after pulling out

4 监测结果分析

4.1 土体沉降和隆起

距离试桩 24m 的水平范围内,取第 1,3,5,7,9 组测点在地下 1m 处的土体沉降和隆起数据进行分析,监测结果如图 6,7 所示。由图 6 可知,整个沉桩及拔桩过程均使浅层土体产生隆起,且隆起与时间的关系呈“双峰型”;沉桩完毕时隆起值快速增加,出现了第 1 次峰值,随后隆起缓慢减小;从拔桩一半开始,隆起值再次增加,至拔桩完毕并注浆后 6h 出现第 2 次峰值,随后又逐渐减小;各测点隆起值第 2 次峰值均稍大于第 1 次峰值。可见,PC 桩沉桩时有一定的挤土效应,桩体的挤压与排土使周边浅层土体产生隆起,沉桩完毕后,随着时间的推移,隆起逐渐收敛;桩体拔出时,由于桩体的上拔力使桩壁与土体产生相对摩擦,土体在向上的摩擦力作用下出现了隆起形态;此外,虽然本工程 PC 桩的钢管桩直径大,但由于桩壁较薄,桩体实际排土断面较小,且拔出时桩体带土少,因此,拔出时周边浅层土体出现隆起而非下陷。距离试桩最近的第 1 组测点(距桩 1m)隆起值显著高于其他测点,该测点沉桩完毕时土体隆起 25mm,注浆后 6h 土体隆起 28mm。由图 7 可知,在距桩 5m 处的土体隆起值较距桩 1m 处的隆起值显著减小。可见,浅层土体受桩体打拔影响最大的位置为贴近桩边处,且土体隆起值随着与桩体距离的增大而减小。

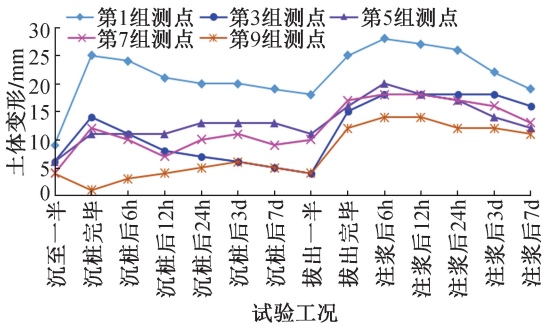


图 6 各测点土体隆起随时间的变化

Fig. 6 Soil resilience with time at each measuring point

4.2 孔隙水压力

孔隙水压力测点距地面 1.8, 4.9, 7.2, 11.5,

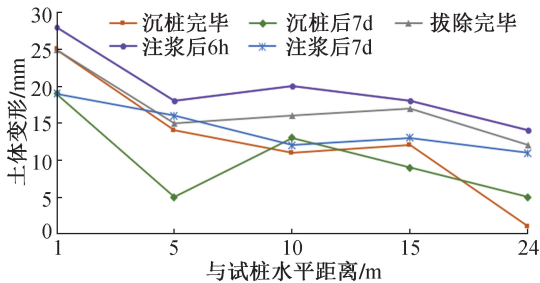


图 7 各阶段不同位置土体隆起

Fig. 7 Soil resilience at different positions in each stage

16.8, 22.5m。第 2 组测点(距试桩水平距离 1m)孔隙水压力随时间的变化如图 8 所示,由图 8 可知,沉桩及拔桩均使土体内产生了孔隙水压力;近地表处的孔隙水压力小且整个试验过程几乎没有变化;沉桩至一半到沉桩后 7d 的时间段内,孔隙水压力缓慢积累,且积累过程中,沉桩 24h 之前的孔隙水压力呈缓慢增加状态,沉桩后 3d 开始,个别测点孔隙水压力略有衰减,但衰减幅度不明显;拔出一半至注浆后 6h 时间段内,孔隙水压力迅速增大并达到峰值,可见,拔桩对土体的影响显著大于打桩影响;注浆后 6h 以后,孔隙水压力的积累逐渐衰减。第 10 组测点(距试桩水平距离 24m)孔隙水压力随时间的变化如图 9 所示,与图 8 对比可知,孔隙水压力随着距试桩距离的增大而减小,距桩平面距离为 24m 处的最大孔隙水压力为距桩 1m 处的 1/3~1/2。

打拔桩及注浆施工时,外部荷载对水土体产生了附加压力,而场地内深厚的④淤泥质黏土层及⑤黏土层渗透系数小(现场注水试验结果表明,渗透系数平均值分别为 $6.5 \times 10^{-7} \sim 9.5 \times 10^{-7}$, $5.0 \times 10^{-7} \sim 6.2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$),在附加压力作用下,土体有体变趋势,土中原有水压上升,上升的这部分压力即产生了超孔隙水压力^[5]。

对拔桩后产生的土体空隙进行注浆,由试验结果可知,注浆后的土中产生的超孔隙水压力比打桩时大,这是由于注浆压力对土产生的附加压力较大。因此,施工时应应对注浆压力进行控制(本工程控制在 0.5~1.0MPa),避免由于过大的土内附加压力而产生超孔隙水压力,导致土体破坏对周边环境造成影响。

4.3 土体倾斜

第 1 组测点测得的土体斜如图 10 所示。由图 10 可知,土体倾斜主要发生在桩上部 12m 范围内,桩下部 12m 范围内土体倾斜逐渐稳定并趋近于 0;沉桩完毕及拔桩完毕时的土体倾斜较大;沉桩后 3d 的土体倾斜比刚沉桩完毕时有较大幅度的减小;拔

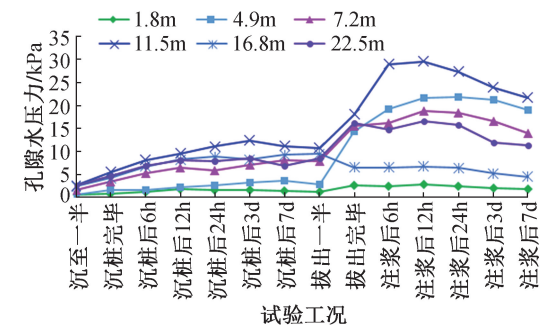


图 8 第 2 组测点孔隙水压力

Fig. 8 Pore water pressure of No. 2 measuring point

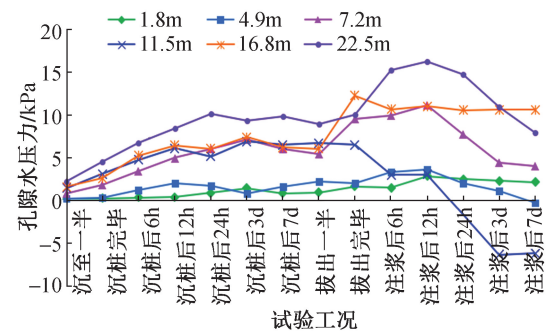


图 9 第 10 组测点孔隙水压力

Fig. 9 Pore water pressure of No. 10 measuring point

桩完毕后,土体倾斜逐渐减小,注浆 7d 后的倾斜约为刚拔出完毕时的一半。可见,沉桩及拔桩将对周边土体产生一定的挤土影响,且影响主要在上部 1/2 桩长范围内。

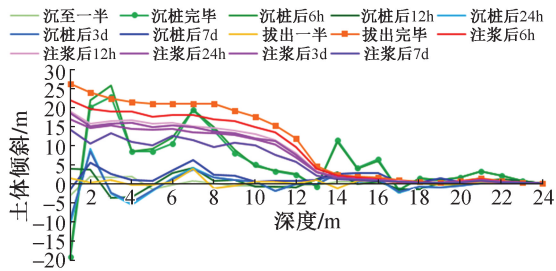


图 10 1 号测点各阶段土体测斜

Fig. 10 Soil oblique at each stage of No. 1 measuring point

5 加长桩原位试打

本基坑集水井等局部靠近深坑区域的围护钢管桩较普遍区域作了加长,加长桩的桩长为 26m (普遍区域为 24m)。基坑大范围打桩前,对第 1 根加长桩进行原位试打,发现沉至最后 2m 时沉桩速度显著减小,这是由于第⑥层暗绿色粉质黏土硬度较高。因此,结合之前 24m 时试桩打桩速度,对原打桩设备型号作升级更换,选取更合适的沉桩设备型号,以提高沉桩效率并确保钢管桩顺利打入设计标高。

将 28RF 型高频免共振锤更换为 36RF 型,其最大激振力为 2 030kN,最大频率为 2 300r/min,最大偏心力矩 343N·m,最大静拔桩力 500kN,最大振幅(含夹具)13.7mm,可打最大桩重 21t。现场采用了 100t 的桁架式履带式起重机,并采用大功率日立机械手配合 ICE 高频免共振锤施工。ICE 高频免共振锤型号更换后,可将 26m 加长桩顺利打至设计标高,整根桩沉桩时间约 40min,且设备噪声也相应减小,距离试桩 1, 10, 20m 处的噪声分贝分别为 98, 90, 84dB(A),可见 36RF 型高频免共振锤更适用于本工程。

6 结语

- 1)采用较短的同截面钢管桩引孔有助于确保首根钢管桩的垂直度与定位精度。
- 2)钢管桩完全打入地面后,桩内无空腔,土体可充满整个钢管桩内部;钢管桩打入及拔出时,近桩浅层土体隆起;钢管桩拔出后,原桩位处无土体空洞,拔出后的钢管桩壁仅有少量泥皮附着,未大量带土。
- 3)在深厚淤泥质黏土及黏土中,注浆对土的附加压力可导致超孔隙水压力的产生,施工时应控制注浆压力。

参考文献:

[1] 赵豫鄂,曹杰,彭韬宇,等. PC 工法桩在水上深基坑工程中的应用[J]. 施工技术(中英文),2022,51(4):133-136.
ZHAO Y E, CAO J, PENG T Y, et al. Application of PC piles in water deep foundation excavation engineering [J]. Construction technology, 2022, 51(4): 133-136.

[2] 许海明,郭生根,卢纪璠,等. PC 工法桩在基坑支护中的研究及应用[J]. 施工技术,2019,48(4):85-89.
XU H M, GUO S G, LU J F, et al. Research and application of PC engineering piles in foundation excavation supporting[J]. Construction technology, 2019, 48(4): 85-89.

[3] 徐建军. 钢管拉森钢板桩组合围护体系施工技术[J]. 施工技术,2018,47(7):60-63,148.
XU J J. Steel larsen steel sheet pile construction technology of composite retaining system[J]. Construction technology, 2018, 47(7): 60-63,148.

[4] 杜来斌. PHC 管桩土塞效应浅析[J]. 工业建筑,2005(S1):590-594,612.
DU L B. Brief analysis of plug effect of PHC pipe piles[J]. Industrial construction, 2005(S1):590-594,612.

[5] 赵一锦,谢建斌,宋桂丽,等. 高频振动沉桩的试验及数值模拟分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2021,39(6):706-712.
ZHAO Y J, XIE J B, SONG G L, et al. High-frequency vibration pile driving test and numerical simulation analysis[J]. Journal of Shihezi University (natural science), 2021, 39(6): 706-712.