

文章编号:1674-8190(2019)01-132-07

# 基于回归分析的低空空域资源可用性评价

王泽坤<sup>1,2</sup>, 吴明功<sup>1,2</sup>, 温祥西<sup>1,2</sup>, 聂党民<sup>1,2</sup>, 蒋旭瑞<sup>1,2</sup>

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

(2. 空军工程大学 国家空管防相撞技术重点实验室, 西安 710051)

**摘要:** 低空空域资源一直是通用航空产业发展的瓶颈, 是制约我国通用航空发展的关键因素之一。基于理论研究和实地调研, 构建低空空域资源可用性评价指标体系, 运用多元线性回归法对影响低空资源的军/民航各项因素进行系统分析, 确定各级指标权重; 以江苏省为例, 深入分析该省低空可利用资源的现状, 总结各地区实际情况和大量数据, 通过多元线性回归结果显示各项因素对该地区的影响值; 最后得出低空空域资源可用性结果。结果表明: 采用回归分析方法分析低空空域资源, 所得结果是科学且有效的, 可为我国低空空域资源合理利用以及通用航空活动空域申报提供参考。

**关键词:** 低空空域; 多元线性回归; 管制区; 雷达空域; 空域资源

中图分类号: V355

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.017

## Evaluation Method of Usability of Low Altitude Airspace Resources Based on the Regression Analysis

Wang Zekun<sup>1,2</sup>, Wu Minggong<sup>1,2</sup>, Wen Xiangxi<sup>1,2</sup>, Nie Dangmin<sup>1,2</sup>, Jiang Xurui<sup>1,2</sup>

(1. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Low altitude airspace resources has always been the development bottleneck of the general aviation industry, and is also one of the key factors in restricting the development of general aviation in China. Based on theoretical research and field research, the evaluation index system is constructed for the availability of the low-altitude airspace resources. By using the multivariate linear regression method to analyze the influence factors of the military and civil aviation which affect low altitude aviation resource, the index weight is determined at all levels. Taking Jiangsu province for example, firstly the current situation of the available low altitude airspace resources in Jiangsu province is analyzed. Then the regional actual situations and the collected large amounts of data are summarized. Finally through multiple linear regression, the influence value of various different factors on the region is obtained and the low-altitude airspace resource availability can be received as a result. The research results show that the method is scientific and effective, and can provide a reference for rational use of China's low altitude airspace resources and the declaration of general aviation airspace.

**Key words:** low altitude airspace; multiple linear regression; control area; radar airspace; the airspace resources

收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-04-24

通信作者: 温祥西, wxxajy@163.com

引用格式: 王泽坤, 吴明功, 温祥西, 等. 基于回归分析的低空空域资源可用性评价[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 132-138.

Wang Zekun, Wu Minggong, Wen Xiangxi, et al. Evaluation method of usability of low altitude airspace resources based on the regression analysis[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 132-138. (in Chinese)

## 0 引言

低空空域资源的开发与利用,是通用航空发展的保障基础。我国“十三五”期间及未来一段时期是全面建成小康社会、实现基本现代化的关键时期,也是实现由民航大国向民航强国转变的重要时期。对低空空域资源可用性进行评价,其目的是在满足现有空域用户资源需求的前提下,调查低空空域可利用资源的分布情况,为确定通用机场建设和低空空域的管理规划提供决策依据。

国外空域研究发展较早,不论是在管理规划还是在理论研究方面,都比较靠前。D. K. Schmidt<sup>[1]</sup>从管制工作负荷角度分析扇区容量;A. L. David等<sup>[2]</sup>对以往容量评估方法进行总结分析,在此基础上提出了机场容量模型;K. D. Bilimoria等<sup>[3]</sup>通过模拟空域环境,设置航空器架次,通过计算机仿真评估空中交通容量;C. Wanke等<sup>[4]</sup>选择分钟高峰流量作为评价空域利用率的指标,提出了初步预测空域容量的模型;针对多扇区的大范围空域,M. Bloem等<sup>[5]</sup>采用扇区小时流量来计算空域利用率。

近年来,国内也对空域资源开展了积极研究。王萍等<sup>[6]</sup>全面考虑空域管理和空域用户需求,建立了基于灰色关联度的空域利用率模型;李印凤等<sup>[7]</sup>提出了机场终端区利用率评价指标体系;刘丹<sup>[8]</sup>从指标的典型性及可获得性出发,建立了空域使用效能评价指标体系。但上述方法均是基于特定空域资源建立模型,具有较强的针对性,难以直接应用于低空空域资源评价。

随着低空空域活动的不断增加,要求低空空域放开的呼声越来越高,针对我国低空空域资源可用性的研究也逐渐展开。刘晓红等<sup>[9]</sup>从运行层面上分析了我国低空现状以及主要影响因素;闫少华等<sup>[10]</sup>、杨勇等<sup>[11]</sup>对我国低空空域的界定和通用航空活动特点作了详细介绍;在此基础上,张波等<sup>[12]</sup>提出了包含军事训练飞行等影响因素的评价指标体系;孙千锐等<sup>[13]</sup>结合低空运行特点,建立了低空空域运行安全评价指标体系。但上述研究对低空空域资源的分析并未全面考虑军/民航的影响,不能完全反映低空运行的整体特点,分析结果也与实际情况有一定的出入。

本文在孙瑜<sup>[14]</sup>对江苏省低空空域可用资源现

状进行初步分析的基础上,以江苏省为例,全面考虑对低空空域运行可能造成影响的因素,包括航路航线、民航终端区、进近空域以及危险区、限制区、军航飞行管制边界、机场等对低空空域的影响,得到可用低空空域资源范围;并采用回归分析的方法,结合低空空域用户需求,建立低空空域资源评价指标体系,对计算和采集到的样本数据进行分析,得到空域资源的利用情况;最后通过实例,验证该模型的可行性,以期为低空空域资源的研究分析提供参考。

## 1 回归分析

### 1.1 多元线性回归理论

在实际问题中,如果一个变量同时受到多个独立变量的影响,且总体呈线性关系,由此引入多元线性回归模型<sup>[15]</sup>。其数学表达式为

$$y = C_0 + C_1 X_1 + \dots + C_m X_m + e \quad (1)$$

式中: $m$ 为解释变量的数目; $C_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为回归系数; $e$ 为随机误差项,其均值 $E(e) = 0$ ,方差 $D(e) = \sigma^2$ 。

为了使回归模型具有良好的解释能力,建立多元线性回归模型之前,首先要对自变量进行选择,并注意以下四点:

- ①自变量与因变量之间具有明确的线性关系;
- ②自变量之间相互独立,即各变量不存在影响关系;
- ③误差应服从正态分布且期望为0;
- ④自变量应能保证采集到完整的样本数据。

### 1.2 回归分析流程

作为数学统计模型,回归分析有严格的适用条件,在分析的过程中要不断对模型进行判断,具体流程如图1所示。

回归分析的具体步骤如下:

(1)整理原始数据,制作散点图,观察自变量与因变量之间的关系,确定线性关系。

(2)进行多元线性回归分析。通过对拟合优度( $R$ 检验)、方程总体线性显著性( $F$ 检验)、自变量显著性( $t$ 检验)三类检验,最终判定指标的选取是否正确以及方程的线性关系是否显著。

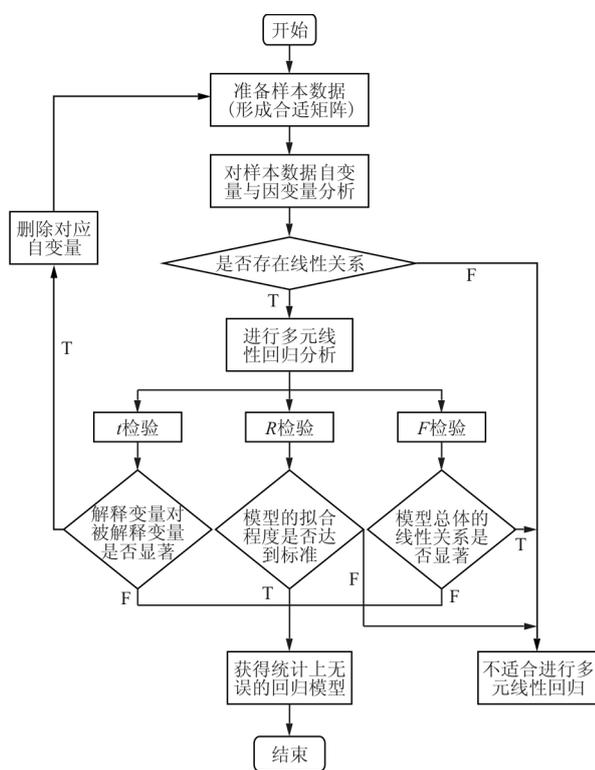


图 1 多元线性回归分析流程

Fig. 1 Multiple linear regression analysis process

## 2 低空空域资源可用性指标体系

### 2.1 影响因素确定

低空空域资源可用性影响因素是空域资源评价指标的来源,其反映了空域资源的特征,并在很大程度上决定了指标体系的科学性和完善性,因此需要多角度、全方位地分析其影响因素。

根据低空空域资源的特殊性,在对某战区空军航管处、民航运输机场以及多个通用机场调研后,结合通用机场选址所需考虑的相关问题和低空空域使用和审批流程,按照指标选取的完整性、可操作性、系统性原则,最终分析得出以下七种主要影响因素:①危险区靶场;②军航穿云航线;③军用机场邻接区;④民用机场本场空域;⑤军航飞行管制区/分区边界;⑥民航机场进近空域;⑦航路航线。

### 2.2 关键指标的确定

低空空域资源可用性受到多方面的影响<sup>[16]</sup>,而指标集选取并不是越多越好,由于存在相互影响,甚至会有包含关系,评价结果反而与实际相差

甚远,因此根据对指标集的简化标准:

- (1) 对目标信息反映较少的指标应当删除;
- (2) 指标集之间应该相互独立。

对上述指标集进行简化,并经过多次数据分析,采取不同的评价指标以及不同的分析方法,综合比较,最后得出一组能全面反映低空空域资源可用性实际情况,并且相互独立的评价指标集。按照其影响程度的大小分为以下五类评价指标。

第 I 类指标:通用航空机场本场空域中危险区、穿云航线区所占面积比例;

第 II 类指标:通用航空机场本场空域中军航邻接区所占面积比例;

第 III 类指标:通用航空机场本场空域中民航雷达空域所占面积比例;

第 IV 类指标:通用航空机场本场空域中管制边界、进近管制空域所占面积比例;

第 V 类指标:通用航空机场中心与周围军航穿云航线区边界和危险区边界的最短距离,取最小值(若通用航空机场中心位于此类空域内,距离计为 0)。

在计算各影响因素所占面积比时,会出现同一块空域受到不止一类指标的影响,本文作出如下简化:当多种指标影响同一片空域,即出现指标叠加时,只考虑影响较大的指标因素,最终各指标的面积比之和必然不大于 1。

### 2.3 低空资源可用性评价方法

为了使指标对低空空域资源的影响量化,结合通用机场半径 5 km 的本场空域范围,考虑各指标对所评价低空空域资源的影响情况时,将空域内各影响指标所占空域比值作为其对该空域的影响值。由于各指标对低空空域资源的影响程度并不相同,采用回归分析的方法求得上述指标权重。

根据已选定的评价指标,建立回归赋权方程:

$$AA = C + \sum_{i=1}^N W_i AC_i + W_L L + \varepsilon \quad (2)$$

式中:AA 为该低空空域资源可用性值;C 为常数项; $W_i$  为第  $i$  类指标权重; $AC_i$  为第  $i$  类空域面积占比; $L$  为该低空空域与重点空域(危险区等)距离; $W_L$  为距离指标权重; $\varepsilon$  为误差项。

对于低空空域资源使用情况,将低空空域资源

根据其被占用情况划分为 10 个等级,1,2,3,...,10 分别代表空域资源可用性程度。邀请空域资源与规划方面相关专家,分别对所选取的各片低空空域打分,计算得出平均值,计为该空域的空域资源可用性等级,并从中选取多个空域进行多元线性回归分析,根据回归结果,得出各指标权重。

### 3 实例分析

#### 3.1 江苏省低空空域使用基本概况

经调查,影响江苏省低空空域的有 14 个军用机场,24 个民用机场。根据相关规定,军航机场邻接区与民航机场雷达空域都有严格的范围界定。江苏省内各民航机场本场空域面积如图 2 和表 1 所示,民用机场空域总面积为 12 941.322 9 km<sup>2</sup>。

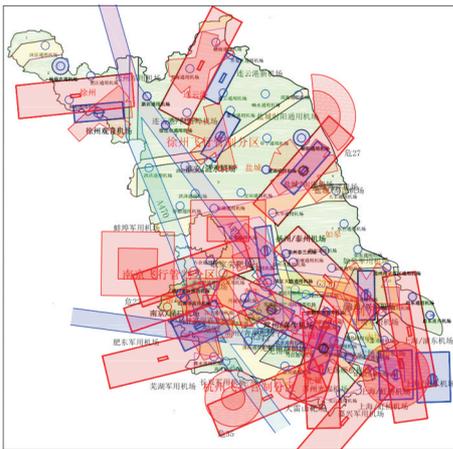


图 2 江苏省空域使用情况

Fig.2 Status quo of the use of airspace in Jiangsu province

表 1 民用机场本场空域  
Table 1 Civil airport airspace

民用机场(共 11 个通航机场)	本场空域面积/km <sup>2</sup>
南京禄口机场	1 950.877 8
徐州观音机场	812.746 1
连云港白塔埠	1 200
.....	.....
新沂	849.380 4

军航将江苏省空域划分为管制分区和机场管制区。军航训飞活动通常是在部队所属的飞行管制分区或机场飞行管制区内实施,训练期间将限制所在管制区及边界临近空域范围内除民航定期航班之外的所有飞行活动。

根据《中国民航班机航线汇编》,在图 2 中画出江苏省域的民航干线航路<sup>[17]</sup>,并标注出危险区、限制区以及边界。

#### 3.2 江苏省低空空域资源回归分析

综合上述空域资源使用情况,危险区、靶场、军航邻接区、民航雷达空域(通航本场空域)、管制界线这五类空域对低空空域资源的使用影响最大,不建议计入低空空域资源,因此将上述空域除外,可以绘制江苏省低空空域资源分布图,如图 3 所示,各部分可用空域面积如表 2 所示。结合通用航空机场建设,为充分利用低空空域资源提供有力的技术支持。



图 3 江苏省低空空域资源分布

Fig.3 Low airspace resources distribution in Jiangsu province

表 2 各部分可用空域面积  
Table 2 Available airspace in each area

模块	面积/km <sup>2</sup>	模块	面积/km <sup>2</sup>
1	714	10	1 061
2	1 757	11	56
...	...	...	...
9	339	18	618

从表 2 可以看出:各部分可用空域面积总和为 41 455 km<sup>2</sup>。

江苏省通用机场布局规划如图 4 所示,依据各机场的场址,对每一个通航机场的低空空域资源可用性进行“专家打分”,最终得到各通航机场的低空空域资源可用性值。

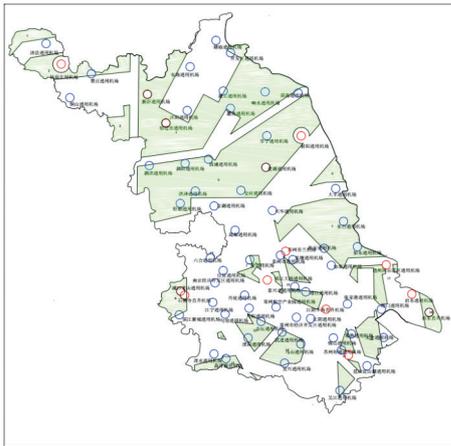


图 4 江苏省通用机场布局规划

Fig. 4 General airport layout planning in Jiangsu province

为了使理论研究与实际相结合,以江苏省远期规划中的通用航空机场选址作为数据选取对象,分

别得出各类评价指标的取值;并邀请多名空域管理和规划领域专家,对所选通航机场本场空域按照十分制的评分标准进行打分。空域资源评价总样本如表 3 所示。

根据统计数据和评分结果,使用数据分析工具对总体样本进行回归分析,所得结果如图 5 所示。

表 3 空域资源评价总样本

Table 3 Total sample of airspace resources evaluation

空域	评分	I	II	III	IV	V
宝应	7	0	0	0	0	8.766 5
滨海	4	0	0	0	0.914 9	17.7
滨江	3	0	0.575 5	0.263 1	0	0
常产	1	1	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...
常熟	3	0	0	0	0.861 5	7.246 9

注: I ~ V 分别对应 2.2 节中确定的五个指标。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	SUMMARY OUTPUT								
2									
3	回归统计								
4	Multiple R	0.942464056							
5	R Square	0.888238496							
6	Adjusted R Square	0.87807836							
7	标准误差	0.944930051							
8	观测值	61							
9									
10	方差分析								
11		df	SS	MS	F	Significance F			
12	回归分析	5	390.300732	78.0601464	87.42387252	6.57632E-25			
13	残差	55	49.10910405	0.892892801					
14	总计	60	439.4098361						
15									
16		Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
17	Intercept	6.568799396	0.292406537	22.46461202	2.20548E-29	5.982803602	7.15479519	5.982803602	7.15479519
18	X Variable 1	-5.468061519	0.37495481	-14.58325478	1.50906E-20	-6.219487749	-4.71663529	-6.219487749	-4.716635289
19	X Variable 2	-4.85721074	1.027502106	-4.727202709	1.62237E-05	-6.916370976	-2.7980505	-6.916370976	-2.798050504
20	X Variable 3	-4.797466231	0.499997277	-9.59498472	2.40227E-13	-5.799483165	-3.7954493	-5.799483165	-3.795449297
21	X Variable 4	-3.701085229	0.435181474	-8.504693907	1.32242E-11	-4.573208391	-2.82896207	-4.573208391	-2.828962067
22	X Variable 5	0.03798488	0.008472894	4.483105983	3.77849E-05	0.021004822	0.054964939	0.021004822	0.054964939

图 5 原始数据分析结果

Fig. 5 Raw data analysis results

该模型采用残差 95% 的置信区间,图 5 中的第一张表为 R 检验表,第二张表为 F 检验表,第三张表为 t 检验表。

从 R 检验表可以看出: Multiple R = 0.94 246,即指标集与低空空域资源之间高度正相关;R Square=0.88 823,表明选取的指标可以解释低空空域资源可用性变差的 88.82%;Adjusted R Square=0.8 781,即选取的指标集可以说明低空空域资源可用性的 87.81%。标准误差越小,说

明拟合程度越好。

从 F 检验表可以看出:Significance F(F 显著性统计量)远小于显著性水平 0.05,因此该模型总体回归效果较好。

从 t 检验表可以看出:E 列为各项指标权重的 t 统计量的 P 值,该列的 E17~E22 均远小于显著性水平 0.05,因此该方程中的指标集与低空资源可用性相关,即这些指标集的回归系数显著。

预测的偏差如表 4 所示,预测值与对应残差之

间分布图如图 6 所示。

表 4 预测偏差  
Table 4 Predicted deviation

空域	评分	预测 Y	残差
宝应	7	6.731 860	0.268 140
滨海	4	3.832 073	0.167 927
滨江	3	3.026 070	-0.026 070
常产	1	0.978 883	0.021 117
...	...	...	...
常熟	3	3.476 670	-0.476 670

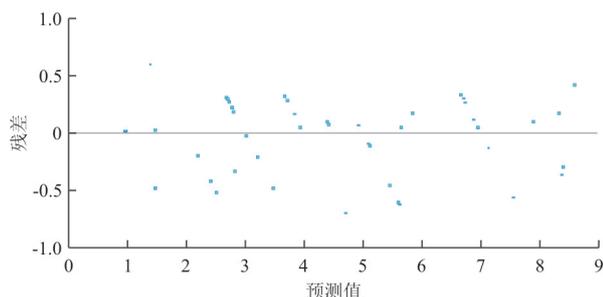


图 6 预测值与对应残差之间分布图

Fig. 6 The distribution of predicted values and corresponding residuals

从图 6 可以看出:除个别点外,该模型总体上满足残差的等方差性要求。整个分析结果表明对应总体的模型较好地满足了多元线性回归模型的要求。

最终得到回归方程为

$$y = 6.5688 - 5.468AC_1 - 4.857AC_2 - 4.797AC_3 - 3.701AC_4 + 0.038L \quad (3)$$

从分析结果可以得出:危险区和军航穿云航线区对低空空域可用性影响最大,军航邻接区与民航雷达空域对低空空域资源的影响基本一致。

对比现有通航机场,将徐州杨庙通用机场各数据带入式(3),得到结果为 7.2,而该空域内无各类空域用户活动,且距离危险区边界 17 km 以上,运行良好;将江阴华西通用机场各数据带入式(3),得到结果为 0.98,整个空域位于军航穿云航线下方,空域难于协调,运行不便。各通航机场的实际运行情况与预测结果基本相符,证明了方法的实用性和有效性。

## 4 结 论

本文采用回归分析方法,有效地对低空空域资源进行分析,得出以下结论:

(1) 原始数据易于获取,运算方法简单,可操作性强。运用大量数据分析,结果真实可靠。

(2) 引入空域用户需求,选取五类评价指标,对低空空域比较全面、准确地作出评价。

(3) 评价结果给出低空空域资源可用性值,可以对范围内低空空域使用情况作出清晰判断,为低空空域使用和通航机场的建设提供科学依据。

### 参考文献

- [1] Schmidt D K. Queueing analysis of the air traffic controller's work load[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 1978.
- [2] David A L, Caroline N, Gerald S. The aviation system analysis capability airport capacity and delay models[M]. USA: NASA Langley Technical Report Server, 1998.
- [3] Bilimoria K D, Sridhar B, Grabbe S R, et al. FACET: Future ATM concepts evaluation tool[C]. The 3rd USA/Europe ATM 2001 R&D Seminar, 2001.
- [4] Wanke C, Song L, Zobell S, et al. Probabilistic congestion management[EB/OL]. (2005) [2018-03-17]. [http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=b06dc852ca80ff493022634e0a8547e4&site=xueshu\\_se](http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=b06dc852ca80ff493022634e0a8547e4&site=xueshu_se).
- [5] Bloem M, Michael P, Kopardekar, et al. Combining airspace sectors for the efficient use of air traffic control resources[EB/OL]. (2008) [2018-03-17]. [http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=10511af650a15c2d8fdcf7c858002666&site=xueshu\\_se](http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=10511af650a15c2d8fdcf7c858002666&site=xueshu_se).
- [6] 王萍, 俞文军, 张兆宁. 基于主成分分析和灰色关联度的空域利用率[J]. 航空计算技术, 2012, 42(3): 63-67. Wang Ping, Yu Wenjun, Zhang Zhaoning. Airspace utilization rate based on principal component analysis method and gray correlation degree[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(3): 63-67. (in Chinese)
- [7] 李印凤, 胡明华, 谢华, 等. 基于可拓多层次状态分类的终端区利用率评价[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2533-2539. Li Yinfeng, Hu Minghua, Xie Hua, et al. Terminal area utilization rate evaluation based on extension multi-level state classification [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12): 2533-2539. (in Chinese)
- [8] 刘丹. 基于主成分分析的空域使用效能评价[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2015. Liu Dan. The assessment of airspace utilization efficiency based on primary component analysis[D]. Guanghan: Civil

- Aviation Flight University of China, 2015. (in Chinese)
- [9] 刘晓红, 左保龙. 我国低空空域开放有关问题的思考[J]. 空中交通管理, 2008(3): 4-6.  
Liu Xiaohong, Zuo Baolong. Thoughts on issues concerning opening low air airspace in China[J]. Air Traffic Management, 2008(3): 4-6. (in Chinese)
- [10] 闫少华, 邢文文. 国际低空空域管理办法与启示[J]. 中国民用航空, 2009(11): 30-32.  
Yan Shaohua, Xing Wenwen. International practice in low-level airspace management and the revelations[J]. China Civil Aviation, 2009(11): 30-32. (in Chinese)
- [11] 杨勇, 隋东. 我国低空空域改革和通用航空事业发展有关问题的思考[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 12(2): 50-53.  
Yang Yong, Sui Dong. Thoughts on reforming low altitude airspace and development of general aviation in china[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 12(2): 50-53. (in Chinese)
- [12] 张波, 陈金良, 王三强. 空域利用率概念模型及算法研究[J]. 空中交通管理, 2011(2): 4-7.  
Zhang Bo, Chen Jinliang, Wang Sanqiang. Studies on the concept model and algorism of airspace utilization rate[J]. Air Traffic Management, 2011(2): 4-7. (in Chinese)
- [13] 孙千锐, 姚登凯, 李艺辉, 等. 低空空域运行安全综合评价方法研究[J]. 安全与环境学报, 2016(6): 33-38.  
Sun Qianrui, Yao Dengkai, Li Yihui, et al. Probe into the evaluation method for low altitude airspace operation safety [J]. Journal of Safety and Environment, 2016(6): 33-38. (in Chinese)
- [14] 孙瑜. 江苏省通用航空低空空域资源现状及特征分析[J]. 现代交通技术, 2015(1): 63-65.  
Sun Yu. Current situation and characteristics analysis for low altitude airspace resource general aviation in jiangsu province[J]. Modern Transportation Technology, 2015 (1): 63-65. (in Chinese)
- [15] 裴成功, 韩松臣, 刘星. 管制员工作负荷评估的回归分析法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 107-112.  
Pei Chenggong, Han Songchen, Liu Xing. Regression analysis method for evaluating ATC controller workload[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 39(1): 107-112. (in Chinese)
- [16] 朱晓波. 浅谈我国低空空域运行管理现状及发展[J]. 海峡科技与产业, 2016(3): 56-57.  
Zhu Xiaobo. The current situation and development of low-level airspace operation and management in China [J]. Technology and Industry Across the Straits, 2016(3): 56-57. (in Chinese)
- [17] 中国民用航空局. 中国民航航班航线汇编[M]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
Civil Aviation Administration of China. Compilation of CAAC flight routes [M]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:

**王泽坤**(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域管理与运行安全。

**吴明功**(1966—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域管理与运行安全。

**温祥西**(1966—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域管理与运行安全。

**聂党民**(1966—),男,硕士,副教授。主要研究方向:空域管理与运行安全。

**蒋旭瑞**(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行冲突探测与解脱。

(编辑:马文静)